

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**ANALISIS DE PARAMETROS DE CALIDAD DE
SERVICIO EN REDES DE COBERTURA AMPLIA
POR SATELITE**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

MABEL VAZQUEZ BRISEÑO

Ensenada, Baja California. Agosto de 2001.

TESIS DEFENDIDA POR

Mabel Vázquez Briseño

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



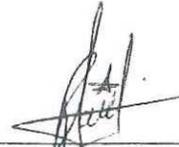
Dr. Roberto Conte Galván

Director del Comité



Dr. Pedro Negrete Regagnon

Miembro del Comité



M.C. Raúl Tamayo Fernández

Miembro del Comité



P.A. Enrique Medina

Dr. José Luis Medina Monroy

*Jefe del Departamento de Electrónica y
Telecomunicaciones*

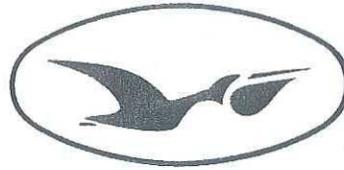


Dr. Luis Alberto Delgado Argote

Director de Estudios de Posgrado

Agosto del 2001

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



CICESE
MR

DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE
SERVICIO EN REDES DE COBERTURA AMPLIA
POR SATÉLITE**

TESIS

**Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el
grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:**

MABEL VÁZQUEZ BRISEÑO

Ensenada, Baja California, México. Agosto del 2001

RESUMEN de la Tesis de **Mabel Vázquez Briseño**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California, México. Agosto del 2001.

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO EN REDES DE COBERTURA AMPLIA POR SATÉLITE.

Resumen aprobado por:



Dr. Roberto Conte Galván
Director de Tesis

La interconexión de redes ATM mediante enlaces satelitales es una opción para la implementación de redes de cobertura amplia con soporte de servicios de banda ancha. Sin embargo existen serias complicaciones que deben resolverse para que esta interconexión cumpla con los exigentes parámetros de calidad de servicio, sobre todo para el caso de voz tipo CBR.

En este trabajo de tesis se lleva al cabo un análisis del comportamiento de los parámetros de calidad involucrados en redes de cobertura amplia y de banda ancha, específicamente el caso de redes ATM atendiendo servicios de voz a tasas constantes de bit (CBR), con la finalidad de determinar los elementos y dimensiones del sistema para los cuales la interconexión satelital de redes ATM cumple con la garantía de calidad de servicio. Se analizan distintas tasas de tráfico y tamaño de memoria para obtener valores de transferencia en el retardo de celdas (CTD), variación en el retardo (CDV) y relación de celdas perdidas (CLR) para la transmisión de voz tipo CBR por satélite.

Se presenta el modelo de simulación realizado utilizando el programa de cómputo OPNET (Optimized Network Engineering Tools), para diseñar un sistema que opere con las características de redes ATM interconectadas por satélite, el cual es compartido mediante la técnica de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access).

Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de las etapas de modelaje, simulación y análisis de resultados, así como las recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros relacionados con esta investigación.

Palabras clave: ATM, Calidad de servicio, Tecnología satelital.

ABSTRACT of the Thesis of **Mabel Vázquez Briseño**, presented as a partial requirement to obtain the **MASTER in SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, Mexico. August 2001.

ANALYSIS OF QUALITY OF SERVICE PARAMETERS IN SATELLITE WIDE AREA NETWORKS

Approved by:



Dr. Roberto Conte Galván
Thesis Advisor

The use of ATM networks over satellite links represent an attractive option to combine wide area networks (WAN), considering the specific characteristics of satellite communication systems and broadband traffic resulting from voice, data, and video services. However, there are important aspects that must be resolved to implement satellite-ATM networks in order to satisfy the required Quality of Service (QoS) parameters, especially for constant bit rate (CBR) voice applications.

This thesis deals with the analysis of the QoS parameters and its behavior over satellite links, which are involved with wide area networks and broadband traffic. The objective of this analysis is to define the elements and dimensions of the system for which the QoS can be satisfied.

Different traffic rates and network sizes are analyzed in order to define the optimum Cell Transfer Delay (CTD), Cell Delay Variation (CDV) and Cell Loss Ratio (CLR) parameters required to provide guaranteed QoS. Buffer memory size and the network dimensions are determined in order to provide the most efficient QoS parameters within the typical GEO satellite constrains and limitations.

The simulation presented in this work was carried out in OPNET (OPTimized Network Engineering Tools), to design the system that interconnects satellite- ATM networks and analyze the effects of the satellite link on the QoS parameters and the dimensions of the system.

Keywords: ATM, Quality of service (QoS), satellite technology.

DEDICATORIA.

Este trabajo de tesis esta dedicado con respeto y amor:

A

MIS PADRES

Luz Ma. Briseño y Raúl Vázquez

**A quienes les debo todo lo que soy ya que han sabido orientarme siempre
con libertad, cariño y confianza.**

AGRADECIMIENTOS.

A mis hermanos, **Ivan y Aracely**, porque siempre me han impulsado a seguir adelante con su confianza y apoyo incondicionales.

A mis sobrinitos, **Ivan, Annette y Alana**, que me han dado muchos instantes de alegría así como motivos para superarme y lograr que se sientan orgullosos de su tía.

A **Marco** por todo lo que compartiste conmigo y por todo lo que aprendí contigo en cada momento que convivimos.

A **Cornelio, Alfredivo, Hector, Roque, Victor y Yasbel** por ser mis amigos en los buenos y en los malos momentos.

A mis amigos de La Paz, **Hector, Verónica, Isaura, Paris y Armando**, por que hemos seguido juntos compartiendo nuestros logros.

A mi director de tesis, **Dr. Roberto Conte Galván**, por sus sugerencias y orientación para realizar este trabajo de tesis.

A los miembros de mi comité de tesis **Dr. Pedro Negrete Regagnon y M.C. Raúl Tamayo Fernández**, por su interés y apoyo en la realización de este trabajo.

A mis **maestros y compañeros**, porque gran parte de lo que aprendí en CICESE fue gracias a los conocimientos que compartieron conmigo.

Al CICESE por brindarme la posibilidad de seguir estudiando.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado para realizar este trabajo.

A México.

CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	
I.1 Antecedentes	1
I.2 Objetivos	5
<i>I.2.1 Objetivo general</i>	5
<i>I.2.2 Objetivos particulares</i>	5
I.3 Infraestructura Utilizada	6
I.4 Organización del Documento de Tesis	7
II. TECNOLOGÍA SATELITAL	
II.1 Introducción	8
II.2 Conceptos Básicos	9
<i>II.2.1 Tipos de satélites</i>	9
<i>II.2.2 Carga útil del satélite</i>	10
<i>II.2.3 Banda de frecuencia</i>	12
<i>II.2.4 Segmento terrestre</i>	13
II.3 Modulación Digital	15
II.4 Técnicas de Acceso Múltiple	16
<i>II.4.1 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)</i>	19
<i>II.4.2 Acceso múltiple por división de código (CDMA)</i>	19
<i>II.4.3 Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)</i>	19
III. REDES DE BANDA ANCHA: ATM	
III.1 Introducción	23
III.2 Funcionamiento General de ATM	23
<i>III.2.1 Formato de celda ATM</i>	25
III.3 Calidad de Servicio en ATM	27
<i>III.3.1 Parámetros de tráfico</i>	28
<i>III.3.2 Parámetros de calidad de servicio</i>	29
<i>III.3.3 Categorías de servicio</i>	32
III.4 Modelo de Capas ATM	34
<i>III.4.1 Capa física</i>	35
<i>III.4.2 Capa ATM</i>	36
<i>III.4.3 Capa de adaptación ATM</i>	36
III.5 Conmutadores en ATM	40
<i>III.5.1 Operación de los conmutadores ATM</i>	40
<i>III.5.2 Métodos de colas de espera (buffers) en conmutadores ATM</i>	42
<i>III.5.3 Parámetros de desempeño en conmutadores ATM</i>	44
III.6 Jerarquía Digital Síncrona (SDH)	45

IV. TELEFONÍA SOBRE ATM POR SATÉLITE	
IV.1 Introducción	51
IV.2 Interconexión de Redes ATM por Satélite	52
<i>IV.2.1 Características del sistema satelital</i>	53
<i>IV.2.2 Método de transporte de celdas</i>	54
<i>IV.2.3 Técnica de recuperación de errores</i>	57
IV.3 Retardo en la Transmisión por Satélite	60
IV.4 Impacto del Enlace Satelital en la Calidad de Servicio	65
IV.5 Características del Servicio Telefónico	68
V. MODELO DE SIMULACIÓN	
V.1 Introducción	71
V.2 Descripción del Modelo de Red	73
V.3 Descripción de Nodos y Procesos	75
<i>V.3.1 Satélite</i>	75
<i>V.3.2 Estaciones de voz</i>	77
<i>V.3.3 Conmutador ATM</i>	83
<i>V.3.4 Equipo ATM/SDH</i>	86
<i>V.3.5 Nodo Transmisor</i>	89
VI. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
VI.1 Simulaciones Realizadas	92
VI.2 Presentación y Análisis de Resultados	98
<i>VI.2.1 Resultados para el enlace punto a punto a 52 Mbps</i>	99
<i>VI.2.2 Resultados para el enlace punto a punto a 13 Mbps</i>	107
<i>VI.2.3 Conclusiones para enlaces punto a punto</i>	114
<i>VI.2.4 Resultados para el enlace con acceso múltiple TDMA</i>	116
<i>VI.2.5 Conclusiones para el enlace con acceso múltiple</i>	127
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
VII.1 Conclusiones	129
VII.2 Aportaciones	132
VII.2 Trabajos Futuros	133
REFERENCIAS	134
ACRÓNIMOS	137
APÉNDICE A. CÁLCULO DE ENLACE EN BANDA Ka	139

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	Acceso múltiple por división de tiempo	20
2	Estructura del marco TDMA	20
3	Red ATM	25
4	Formato de celda ATM	25
5	Comparación de los modelos de capa de ATM y OSI	34
6	Funcionamiento de la capa AAL1	38
7	Esquema básico de un conmutador ATM	41
8	Estructura de multicanalización síncrona	47
9	Módulo de transporte síncrono básico (STM-1)	49
10	Estructura del módulo STM-0	56
11	Dominio de red del modelo de simulación	73
12	Dominio de red de las subredes del modelo	74
13	Modelo de nodo del satélite	75
14	Modelo de nodo de las estaciones de voz	78
15	Modelo de proceso de las fuentes de voz	79
16	Atributos del nodo de las estaciones de voz	80
17	Modelo de nodo del conmutador ATM	83
18	Modelo de proceso del conmutador ATM	84
19	Modelo de nodo del equipo ATM/SDH	86
20	Modelo de proceso ATM/SDH	87
21	Modelo de proceso SDH/ATM	88
22	Modelo de nodo del transmisor	89
23	Modelo de proceso TDMA	90
24	Capacidad del conmutador ATM y retardo máximo en la transferencia de celdas a 52 Mbps	100
25	Capacidad del buffer en relación al número de fuentes y la intensidad de tráfico a 52 Mbps	101
26	Retardo máximo de transferencia de celdas a 52 Mbps	102
27	Retardo promedio de transferencia de celdas a 52 Mbps	103
28	Comparación entre el retardo promedio y máximo de transferencia de celdas a 52 Mbps	104
29	Variación promedio en el retardo de celdas a 52 Mbps	105
30	Capacidad del conmutador ATM y retardo máximo en la transferencia de celdas a 13 Mbps	108
31	Capacidad del buffer en relación al número de fuentes y la intensidad de tráfico a 13 Mbps	109
32	Retardo máximo de transferencia de celdas a 13 Mbps	110

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
33	Retardo promedio de transferencia de celdas a 13 Mbps	111
34	Comparación entre el retardo promedio y máximo de transferencia de celdas a 13 Mbps	112
35	Variación promedio en el retardo de celdas a 13 Mbps	113
36	Retardo promedio de transferencia de celdas con diferentes tamaños de marco TDMA	120
37	Retardo máximo de transferencia de celdas con diferentes tamaños de marco TDMA	121
38	Comparación entre la variación promedio para un enlace punto a punto y con TDMA	122
39	Variación promedio en el retardo con diferentes tamaños de marco TDMA	123
40	Variación promedio en el retardo con tamaños de marco TDMA menores de 10 ms	124
41	Relación de celdas pérdidas con 210 fuentes	126

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I	Bandas de frecuencia más comunes para enlaces satelitales	13
II	Capa de adaptación ATM, categorías y clases de servicio	37
III	Carga útil de los contenedores virtuales en SDH	47
IV	Jerarquía de señales en SDH	48
V	Clases de tráficos y sus parámetros de desempeño correspondientes	67
VI	Parámetros de operación del nodo satélite	76
VII	Intensidades de tráfico simuladas	96
VIII	Tamaño del buffer de la estación terrena	119
IX	Retardos máximos debidos al tamaño del marco TDMA	120

I. INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

Hoy en día las telecomunicaciones resultan un elemento imprescindible en casi todos los ámbitos, involucrando diferentes tecnologías tales como redes de computadoras, telefonía, comunicaciones móviles, enlaces satelitales y redes de fibras ópticas.

Estas tecnologías permiten la comunicación, así como compartir recursos a distancia de una manera efectiva. Además impulsan el desarrollo de la infraestructura de información global (IIG o GII, Global Information Infrastructure). término utilizado para definir los elementos que hacen posible establecer comunicaciones con alcances mundiales a través de redes de cobertura amplia.

Por otra parte, el desarrollo de aplicaciones cada vez más completas, las cuales incluyen una gran variedad de servicios, ha llevado a la necesidad de mejorar estas tecnologías de comunicación. Incluso se han desarrollado otras nuevas, de manera que soporten las nuevas aplicaciones. Esto ha llevado a la evolución de comunicaciones de banda ancha.

Banda ancha es un término técnico utilizado para describir tecnologías de acceso con velocidades mayores de 1.5 Mbps. Involucra también a las que permiten no sólo transportar datos, como sucedía con las redes de computadoras en sus inicios, sino además

aquellos servicios que requieren mayor ancho de banda tales como voz y video, con la capacidad de transportar todos estos servicios en el mismo medio.

Actualmente, las comunicaciones de cobertura amplia que ofrecen capacidades de banda ancha se realizan principalmente a través de dos tecnologías: Internet, el cual es un medio muy utilizado por el fácil y rápido acceso a la información que provee la suite de protocolos de control de transmisión/protocolo de Internet (TCP/IP, Transmission Control Protocol/Internet Protocol) utilizada como el mecanismo de transporte oficial en Internet. Como segunda tecnología se emplea el Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, Asynchronous Transfer Mode), el cual fue diseñado inicialmente como la tecnología de transporte sobre enlaces de fibra óptica para la Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha (BISDN, Broadband Integrated Services Digital Network).

ATM tiene la capacidad de transportar de manera conjunta servicios con características distintas, tales como conmutación de paquetes y de circuitos, de alta y baja velocidad, así como de tasas constantes de bit (CBR, Constant Bit Rate) y de tasas variables (VBR, Variable Bit Rate). Esto se logra mediante la segmentación de las señales de los diferentes tipos de servicio en paquetes de tamaño fijo, llamados celdas, las cuales posteriormente son multicanalizadas utilizando *multicanalización por división de tiempo asíncrona*.

Cada uno de los servicios transportados por ATM se ven afectados de manera distinta por los parámetros de calidad, es decir los parámetros que se especifican para que la

información se transmita en forma eficiente a lo largo de la red, tales como retardo y pérdidas. Estos parámetros son determinantes para la calidad de servicio (QoS, Quality of Service) ofrecida, que puede describirse como la garantía que una red ofrece a una aplicación específica de que se proveerá el nivel de servicio en la transmisión que ésta requiere. Esta garantía es una de las principales diferencias entre ATM y la versión actual del protocolo IP utilizado por Internet, IPv4, el cual no ofrece aún garantías de calidad de servicio a las aplicaciones.

El hecho de tener acceso a una gran variedad de servicios con diferentes características es un aspecto muy importante relacionado con el concepto de interoperabilidad, el cual resulta muy significativo en las telecomunicaciones de la actualidad. Esto se refiere básicamente a la implementación de comunicación universal a todo tipo de redes, que ofrezcan todos los servicios y que pueda llevarse al cabo desde cualquier lugar, en cualquier momento.

Este concepto resulta factible mediante la integración de tecnologías de banda ancha, como es el caso de ATM y de tecnología satelital, la cual tiene varias ventajas con respecto a las transmisiones terrestres, tales como: facilitar la comunicación en regiones donde las redes cableadas resultan muy complicadas de implementar o muy costosas; proveer mayores tasas de bit, y tener un costo de implementación independiente de la distancia de cobertura.

Sin embargo, existen aspectos importantes en el uso de los enlaces satelitales que deben ser considerados para lograr la transmisión del tráfico antes mencionado, sobre todo si se lleva al cabo utilizando redes ATM, las cuales ofrecen garantía en la calidad de servicio, que puede ser degradada por el ambiente satelital.

Los enlaces satelitales introducen retardos entre 100 y 1000 veces mayores que los enlaces terrestres. Actualmente, la mayoría de los sistemas satelitales son geosíncronos (GEO, Geostationary Earth Orbit) y actúan solo como repetidores. Por otro lado, las características de los sistemas satelitales de órbita baja (LEO, Low earth orbit) son diferentes, por lo tanto la utilización de un sistema u otro se reflejará de manera distinta en los parámetros de calidad de servicio. Esto también sucede al elegir la topología para las redes satelitales del tipo VSAT (Very small aperture terminal), así como el hecho de llevar al cabo o no procesamiento a bordo del satélite.

El uso de satélites geoestacionarios genera grandes retardos de propagación de la señal por la distancia que ésta debe recorrer para llegar al satélite; por otra parte, el uso de sistemas de banda ancha tales como ATM a altas velocidades de bit, requieren del uso de gran ancho de banda en el canal satelital. Debido a las características del producto *Retardo-Ancho de Banda* del canal satelital, se crean problemas para dimensionar correctamente las terminales satelitales y sus mecanismos de interconexión a las redes terrestres.

Todos estos aspectos deben analizarse con el fin de determinar aquellos que resulten las mejores opciones para implementar interconexiones de redes ATM mediante enlaces

satelitales en base a los parámetros de calidad de servicio, logrando así una interconexión transparente y efectiva.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 OBJETIVO GENERAL

Este trabajo de tesis analizará los efectos del canal satelital en el comportamiento de parámetros de Calidad de Servicio (retardo de celda, variación en retardo de celda y pérdida de celda) en redes de banda ancha con cobertura amplia mediante el empleo de tecnología satelital. Específicamente el estudio se basa en el análisis del comportamiento del tráfico telefónico (categoría CBR) sobre ATM por satélite, con el fin de definir las mejores opciones que permiten cumplir con los parámetros de calidad de servicio estandarizados.

I.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Con el fin de alcanzar el objetivo anterior se plantean los siguientes objetivos particulares:

1. Estudio de la tecnología satelital con el fin de conocer los requisitos en el diseño de una red de este tipo.
2. Estudio de la tecnología ATM, lo cual incluye adquirir conocimientos sobre las categorías de servicio y sus requerimientos en cuanto a parámetros de calidad.
3. Estudio de los efectos de la transmisión de los servicios ATM a través de enlaces satelitales y determinación de las tecnologías que permitan llevar al cabo esta interconexión.

4. Modelar y simular la interconexión de redes ATM por medio de enlaces satelitales empleando el simulador de redes OPNET.
5. Analizar el comportamiento del modelo ante diferentes cambios en cuanto a velocidad de transmisión y tráfico soportado, con el fin de determinar la capacidad y eficiencia de la red.
6. Determinar, mediante las simulaciones realizadas y el análisis de los resultados obtenidos, las condiciones y dimensiones del sistema bajo las cuales es posible implementar la interconexión de redes ATM por satélite cumpliendo con los parámetros de calidad de servicio aceptables.

I.3 INFRAESTRUCTURA UTILIZADA

Para la realización de este trabajo de investigación se requirió la siguiente infraestructura:

- Estación de trabajo Ultra 5 de SUN Microsystems.
- Herramienta de Simulación de redes OPNET (Optimized Network Engineering Tools). Modeler Versión 7.0 B de la compañía Mil-3.
- Computadora Personal AMD K6-II 300 MHz con 32 Mb en RAM.
- Aplicaciones de computadora como: Microsoft Word, Powerpoint, Visio Professional, Origin 5.0 Professional, Reflection X, MatLab, entre otros.
- Red Local del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la División de Física Aplicada en CICESE.
- Material de biblioteca (CICESE y UCSD).
- Acceso a Internet.

I.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS

El presente documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

En los dos capítulos siguientes se describen las tecnologías satelital y ATM de manera independiente. El capítulo II incluye temas importantes para los sistemas satelitales como son tipos de satélites, técnicas de acceso, técnicas de modulación digital, entre otros. El capítulo III básicamente describe las características de ATM, como son su funcionamiento y modelo de capas. En este capítulo se incluye además una descripción de las categorías de servicio en base a los parámetros de calidad y de tráfico descritos en este trabajo.

En el capítulo IV se realiza una descripción de los elementos que se requieren para lograr la interconexión de redes ATM mediante enlaces satelitales. En base a investigaciones realizadas se muestra cuales tecnologías se consideran en este trabajo para llevar al cabo dicha interconexión y de qué manera afecta el enlace satelital a los servicios de ATM de manera general, aunque en este trabajo se analiza únicamente el servicio CBR para tráfico telefónico.

En el capítulo V se describe el modelo de simulación implementado en el simulador de redes Opnet para interconectar redes ATM satelitales. Finalmente, los capítulos VI y VII muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas así como las conclusiones a las que esta investigación permitió llegar.

II. TECNOLOGÍA SATELITAL

II.1 INTRODUCCIÓN

La primer transmisión satelital, realizada a principios de 1950 [Tomasi,1996], fue llevada al cabo utilizando el satélite natural de la Tierra, la Luna, la cual actuaba como un reflector pasivo, es decir, capaz de rebotar una señal de radio de un lugar a otro. De esta manera, en ese tiempo fue posible establecer un servicio de comunicaciones de larga distancia entre Washington, D.C. y Hawaii, limitado, por supuesto, a la disponibilidad de la Luna. El primer satélite artificial, el *Sputnik I*, fue lanzado por la Unión Soviética en 1957, siendo además el primer satélite activo, es decir, capaz de recibir, amplificar y posteriormente retransmitir esta información. Puede decirse que el *Sputnik I* marcó el inicio del desarrollo en cuanto a tecnología satelital.

En un principio, los sistemas satelitales estuvieron destinados únicamente para enlaces analógicos telefónicos. En la actualidad, la tendencia de las telecomunicaciones es la transmisión digital, la cual ha impulsado el surgimiento de nuevas aplicaciones satelitales. El hecho de que se implemente la compresión de audio y video digital ha provocado que estas aplicaciones sean económicamente factibles, ya que se ha incrementado con esto la capacidad de los satélites. Además, los avances en la tecnología satelital han contribuido a que los satélites sean cada vez más poderosos y de menor peso, así como a contar con estaciones terrenas más pequeñas, lo que ha generado mayor aceptación y, por lo tanto un

incremento en la demanda, provocando como consecuencia una reducción del costo de la transmisión satelital.

II.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Un sistema de comunicaciones satelital consiste de un segmento espacial y un segmento terrestre. El segmento espacial lo constituyen los satélites, los cuales generalmente se clasifican, en base a su órbita, en Geoestacionarios o No Geoestacionarios. Otras de sus características importantes son la banda de frecuencia a la que operan y su carga útil. El segmento terrestre, por otra parte, está compuesto por las estaciones terrenas transmisoras y receptoras. Estos elementos en el sistema satelital pueden conectarse utilizando diversas topologías de red, dependiendo de la aplicación, así como de la distribución y número de usuarios.

II.2.1 TIPOS DE SATÉLITES

Como se mencionó anteriormente, los satélites se clasifican como de órbita geoestacionaria (GEO) y de órbita no geoestacionaria, entre los que se encuentran los satélites de órbita baja (LEO) y de órbita media (MEO, Medium Earth Orbit).

Los satélites GEO se colocan aproximadamente a 35, 786 km sobre el Ecuador, y su movimiento alrededor de la Tierra está sincronizado con la velocidad de rotación de la misma, lo que les permite mantenerse fijos sobre el mismo punto en el planeta. La altitud a la que se colocan hace posible que la huella, o área de cobertura, de un solo satélite GEO abarque aproximadamente una tercera parte de la superficie terrestre, excluyendo las áreas

de latitudes altas, de manera que se logra una cobertura global con sólo tres satélites de este tipo. Por otra parte, el hecho de que un satélite GEO se encuentre tan alejado de la tierra provoca altos retardos de propagación, con valores típicos entre 240 y 280 ms, dependiendo de la distancia entre el satélite y la estación terrena [Akyildiz y Seong-Ho, 1997].

Un satélite MEO se ubica aproximadamente a 20,000 km sobre la tierra, con retardos de propagación típicos de 110 a 130 ms, mientras que los satélites tipo LEO son colocados a altitudes entre 200 y 3000 km con retardos de 20 a 25 ms, que son comparables a los de enlaces terrestres. Estos tipos de satélites, a diferencia de los GEO, no permanecen fijos, por lo que se requiere la utilización de varios satélites durante una transmisión; como consecuencia, entre menor sea la altitud se requiere un mayor número de satélites y por lo tanto, un mayor número de saltos de un satélite a otro, lo que aumenta el retardo durante la transmisión.

En base a sus características, los satélites tipo MEO y LEO son utilizados principalmente para comunicaciones móviles, mientras que los tipo GEO se emplean en enlaces fijos. En base a esto en este trabajo de tesis se considera la utilización de un satélite de este último tipo.

II.2.2 CARGA ÚTIL DEL SATÉLITE

Actualmente, los satélites tiene diferentes aplicaciones y son, por lo tanto, utilizados para diferentes misiones. En base a su aplicación específica tienen diferente carga útil. En el

caso de satélites de percepción remota, por ejemplo, estos cuentan con dispositivos especiales tales como radares de apertura sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar) para realizar sus observaciones. Los satélites de comunicaciones, que son los de interés para este trabajo, cuentan con una carga útil que es la responsable de llevar al cabo las funciones de comunicaciones.

Los satélites tradicionales, específicamente los geoestacionarios, funcionan simplemente como repetidores (bent – pipe). Recientemente se han desarrollado satélites de comunicaciones que incluyen capacidades de procesamiento a bordo (OBP, On -Board Processing), los cuales incluyen funciones mucho más avanzadas como la regeneración de bit, enrutamiento y conmutación, de manera que se logra una utilización más eficiente del canal [Conte, 2000].

La carga útil de un satélite de comunicaciones repetidor (bent-pipe) está compuesta por varios radio receptores/transmisores, los cuales son conocidos como transpondedores, y básicamente se encargan de recibir las señales de radio, procesarlas y posteriormente transmitir las hacia la estación terrena. Generalmente, un transpondedor se define mediante la banda de frecuencia a la que opera, su capacidad de ancho de banda (típicamente 36, 54 ó 72 MHz) así como su Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE). Los principales componentes del transpondedor son: la antena receptora/transmisora, el receptor o amplificador de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier), el convertidor de frecuencia y el transmisor o amplificador de alta ganancia (HPA, High Power Amplifier). Con el fin de

determinar los parámetros de operación requeridos para cada uno de estos elementos, es necesario llevar al cabo un análisis detallado del presupuesto de potencia de la señal transmitida y recibida conocido como cálculo de enlace (Apéndice A). En este cálculo, el valor obtenido es la relación portadora/ruido (C/N , Carrier/Noise), que define la calidad esperada de la señal transmitida en base a los componentes utilizados, así como las pérdidas y atenuaciones más ruido en el canal.

II.2.3. BANDA DE FRECUENCIA

La elección de la banda de frecuencia en la que operará el enlace satelital es uno de los factores determinantes del sistema, ya que, por una parte, está relacionada con la susceptibilidad a interferencias que las transmisiones puedan tener, siendo actualmente más utilizadas las bandas de baja frecuencia como banda C y Ku. Por otra parte, tiene implicaciones importantes en el desempeño del sistema, debido a que tanto las pérdidas por transmisión como el ruido en el enlace de transmisión varían con la frecuencia, lo que define la relación señal a ruido, que a su vez determina la capacidad teórica de transporte de información del enlace y tiene otras implicaciones importantes. La ganancia de la antena también está en función de la frecuencia, ya que incrementar la frecuencia permite utilizar platos reflectores de antenas de menor tamaño.

Considerando la implementación de redes de banda ancha por satélite, es posible afirmar que la banda Ka presenta varias ventajas en relación a banda C y Ku, como es el hecho de ofrecer un mayor ancho de banda del transpondedor, así como la utilización de

componentes de menor tamaño, tales como antenas de muy pequeña apertura (VSAT). Sin embargo, también es necesario considerar que esta banda se ve afectada de mayor manera por los factores ambientales y atmosféricos (Apéndice A.). La tabla I muestra los principales parámetros de las bandas de frecuencias utilizadas para enlaces satelitales [Rogers et al, 1997].

Tabla I. Bandas de frecuencia más comunes para enlaces satelitales.

Banda	Enlace descendente (GHz)	Enlace ascendente (GHz)	Ancho de banda (MHz)
C	4 (3.4 – 4.2)	6 (5.92 – 6.72)	800
Ku	11 (11.7 – 12.2)	14 (13.7-14.5)	500/750
Ka	20 (17.7 – 21.2)	30 (27.0 – 31.0)	1000/1500

II.2.4. SEGMENTO TERRESTRE.

Como se menciona en la sección anterior, la utilización de bandas de frecuencia alta, como es el caso de la banda Ka, permite emplear como estaciones terrenas terminales de muy pequeña apertura conocidas como VSATs. Las VSATs constan usualmente de una antena y un radio transceptor (outdoor unit – ODU), así como de un conjunto de subsistemas de banda base y frecuencia intermedia (indoor unit – IDU). No existe una definición universalmente aceptada del tamaño de las VSATs, pero los reflectores de antena tienen diámetros de 60 cm hasta 2.4 m, con algunos casos de aplicaciones específicas que llegan hasta 7 m de diámetro.

La configuración o topología de red VSAT más común es en estrella interactiva, utilizando un hub o concentrador central, de manera que cualquier comunicación entre usuarios del sistema se lleva al cabo únicamente a través de este dispositivo. Es por ello que esta topología puede presentar serios problemas, ya que la disponibilidad de toda la red depende del concentrador, además de que cualquier transmisión entre dos sitios remotos requiere dos saltos, de la estación fuente al concentrador y de éste hacia la estación destino, lo que incrementa el retardo en el enlace.

Existe una segunda configuración de red la cual no requiere utilizar un concentrador. Ésta consiste en una red con configuración en malla, en la que se usan antenas pequeñas para permitir que los sitios remotos puedan comunicarse directamente entre ellos. Sin embargo, en este caso las estaciones utilizadas son mas complejas que en una configuración en estrella, ya que deben tener la capacidad de realizar más funciones.

En general, la elección de la configuración o topología a utilizarse depende de tres factores [Maral, 1995]: la calidad y capacidad requerido en el enlace, el retardo de transmisión permisible y las características del tráfico. La configuración de red en estrella es la mejor opción cuando se va a llevar al cabo transmisión de datos, mientras que la topología de malla generalmente se utiliza para voz o aplicaciones de dos sentidos, esto debido a que las opciones que utilizan concentrador experimentan, como ya se ha mencionado, retardos muy grandes no aptos para transmisiones de voz.

Los sistemas VSAT con satélites operando en banda Ka proveen una cobertura global con costos operativos bajos y la capacidad de un mayor ancho de banda [Sweitzer J.,1999] .

II.3 MODULACIÓN DIGITAL.

La transmisión digital de señales satelitales es realizada mediante la modulación de una portadora con símbolos codificados para representar los bits de una cadena de información. Cualquier característica de la señal como amplitud, fase o frecuencia, puede ser digitalmente modulada, sin embargo, la modulación en fase, conocida como PSK (Phase shift keying) ha sido adoptada universalmente como la técnica de modulación en sistemas satelitales [Pratt y Bostian, 1986]. Un modulador de fase M-PSK cambia la fase de una portadora a uno de M estados, de acuerdo al valor correspondiente al bit o grupo de bits entrantes. La modulación de fase de dos estados se conoce como BPSK (Biphase) y la de cuatro como QPSK (Quadriphase) [Feher, 1981].

Es posible emplear otro número de estados, así como otras combinaciones de modulaciones de amplitud y fase, sin embargo, BPSK y QPSK son las más utilizadas en enlaces satelitales. La principal razón de ello son los valores de C/N requeridos para tasas de error de bits aceptables (P_e , Probabilidad de error), los cuales resultan mayores en otros tipos de modulación.

Las técnicas de modulación pueden definirse como eficientes en potencia o eficientes en ancho de banda, lo que también se denomina como eficiencia espectral. La eficiencia en potencia puede ser expresada en términos del promedio requerido en la relación de energía

de bit por densidad espectral del ruido (E_b/N_0) para tener una probabilidad de error aceptable. Las técnicas de modulación binarias y de cuatro estados (como BPSK y QPSK) son más eficientes en potencia que las de más estados (8 ó 16 estados), por eso las técnicas de 2 ó 4 estados tienen un mejor desempeño en cuanto a P_e incluso cuando se tienen relaciones C/N muy bajas. Por lo tanto, aún cuando se tengan problemas de atenuación e interferencias, es posible emplear antenas pequeñas en la estación terrena, así como menos potencia en los sistemas del satélite en comparación con las otras técnicas. Por otra parte, la eficiencia de ancho de banda o espectral es frecuentemente expresada en términos del número de bits por segundo por hertz que son transmitidos ($b/s/Hz$). Una técnica de modulación se considera eficiente en potencia si se obtiene una $P_e = 10^{-8}$ con $E_b/N_0 < 14$ dB [Feher, 1981], como es el caso de BPSK y QPSK. Y es espectralmente eficiente con una eficiencia de transmisión > 2 b/s/Hz. Con BPSK se transmite 1 b/s/Hz, mientras que con QPSK se transmiten 2 b/s/Hz, por lo que, bajo estas consideraciones, no resultan técnicas eficientes en ancho de banda.

II.4 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE

En una red satelital el satélite representa un recurso que debe ser compartido entre las estaciones terrenas que deseen transmitir información, para ello se emplean técnicas conocidas como de acceso múltiple (MA, Multiple Access). La elección de la técnica de acceso múltiple tiene un gran impacto en el desempeño de la red satelital, por lo tanto debe elegirse de acuerdo a la carga de tráfico de la red y satisfacer los requerimientos de calidad de servicio (QoS) de los usuarios.

Las técnicas de acceso en el enlace ascendente pueden ser clasificadas de varias maneras de acuerdo a sus características. En base a la manera en la que son utilizadas para establecer conexiones pueden clasificarse en tres tipos:

1. Acceso Aleatorio o Contención: Técnicas como Aloha, el cual es el método de acceso aleatorio más utilizado, o sus variaciones, han sido utilizadas por redes con un gran número de usuarios transportando tráfico a ráfagas de banda angosta. Los usuarios transmiten sin consultar el estado del canal, por lo que transmisiones simultáneas provocan colisiones y por tanto retransmisiones. Sin embargo, las técnicas de contención tienen tasas de caudal eficaz razonables sólo con cargas bajas de tráfico, y no son convenientes para aplicaciones de banda ancha orientadas a conexión, donde se requiere algún tipo de garantía de ancho de banda para asegurar una Calidad de Servicio (QoS) aceptable [Hadjitheodosiuo et al, 1999].
2. Asignación fija: A los usuarios se les asigna un número constante de ranuras, códigos o frecuencias. Esta asignación provoca una eficiencia baja si no se tiene un flujo constante de tráfico ya que las ranuras son desperdiciadas cuando no se tiene información que transmitir. Las técnicas de acceso múltiple por división de tiempo, frecuencia y código (TDMA, FDMA y CDMA) preasignadas, descritas posteriormente en este capítulo, pertenecen a esta categoría. Su principal ventaja es que los usuarios siempre tienen el canal disponible cuando deseen transmitir algo.

3. Acceso múltiple con asignación por demanda (DAMA, Demand Assigned Multiple Access). En las técnicas de asignación por demanda se tiene disponible un número de ranuras, códigos o frecuencias que se asignan a los usuarios cuando estos lo requieren. Una vez asignado el canal, éste queda disponible por la duración del enlace. Al terminar la comunicación se libera el canal, quedando disponible para cualquier otro usuario que lo requiera. En este tipo de acceso se necesita una estación terrena que asigne los canales a los demás, lo que aumenta la complejidad. La asignación por demanda puede ser de tasa fija o de tasa variable.

- Asignación por demanda de tasa fija: El ancho de banda es asignado conforme se necesita. En este caso se realiza una asignación de ancho de banda constante para cada conexión. Este es más flexible que las asignaciones fijas, pero aun se tiene desperdicio de ancho de banda.
- Asignación por demanda de tasa variable: Permite la asignación dinámica de la potencia del satélite y del ancho de banda basado en una carga de tráfico cambiante por parte de los usuarios. Es conveniente en tráfico a ráfagas.

Las técnicas básicas de asignación fija, como se mencionó anteriormente, son FDMA, TDMA y CDMA, las cuales pueden combinarse con DAMA o con otras variaciones de manera que se logre una utilización más eficiente del canal.

II.4.1 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA

En el acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, Frequency-division multiple access) a cada usuario se le asigna una frecuencia diferente (más precisamente una pequeña banda de frecuencias) sobre la cual transmitir, de manera que el ancho de banda total se divide en porciones del mismo tamaño. Debido a que cada estación estará transmitiendo en su banda de frecuencia asignada, en ningún momento se presentan interferencias entre ellas.

II.4.2 ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

En el acceso múltiple por división de código (CDMA, Code Division multiple access), las transmisiones se llevan al cabo asignando a cada estación un código único, de manera que es posible que todas las estaciones transmitan utilizando todo el ancho de banda disponible durante todo el tiempo, mediante técnicas conocidas como espectro ensanchado (spread-spectrum).

II.4.3. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE TIEMPO

En el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, Time-division multiple access), como se muestra en la figura 1, se les asignan posiciones a los usuarios en un programa que se está repitiendo rápidamente para que realicen transmisiones en una frecuencia común hacia el satélite. Ésto se lleva al cabo dividiendo el canal en ranuras de tiempo de tamaño fijo, a cada estación se le asigna una ranura durante la cual tiene acceso a todo el ancho de banda, pero sólo durante el tiempo que dure esta ranura, es decir durante una pequeña

ráfaga de tiempo. Todas las estaciones que están utilizando el mismo transpondedor en el satélite pueden transmitir sus respectivas ráfagas de tráfico en un marco periódico de tiempo, el cual es el *marco* TDMA. Durante la longitud de las ráfagas, cada estación terrena tiene acceso a todo el ancho de banda disponible del transpondedor.

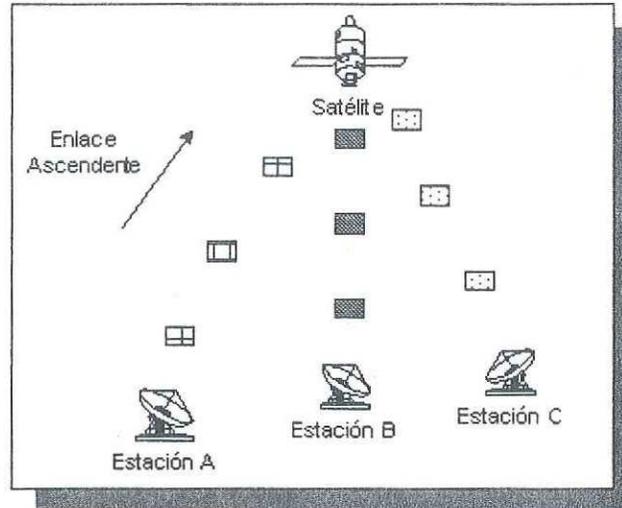


Figura 1. Acceso múltiple por división de tiempo

La estructura del marco TDMA, como se muestra en la figura 2, comúnmente se compone de dos ráfagas de referencia (RB1 y RB2), las ráfagas de tráfico y los tiempos de guarda entre las ráfagas.

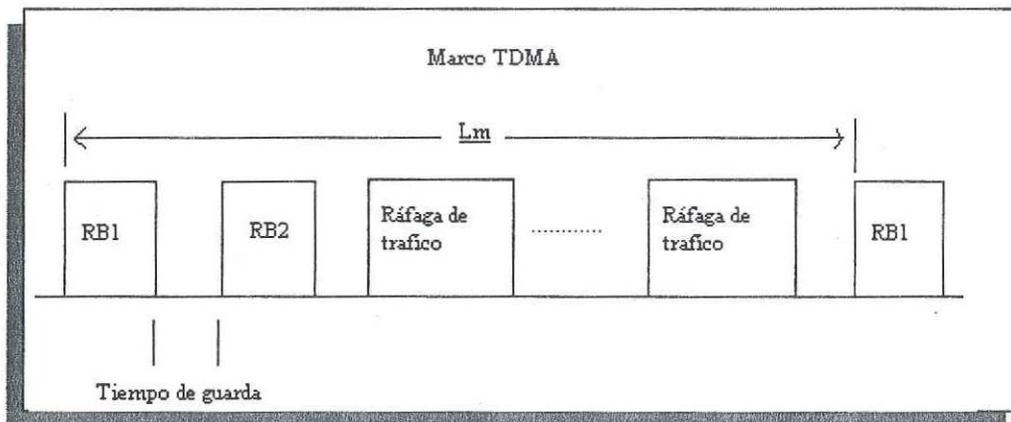


Figura 2. Estructura del marco TDMA

La ráfaga de referencia se emplea para establecer la sincronización entre las estaciones que transmiten durante las ráfagas de tráfico, se utiliza una segunda ráfaga de referencia para una mayor confiabilidad, de esta manera el marco TDMA es el período entre las ráfagas de referencia RB1. El tiempo de guarda incluido en el marco tiene como finalidad evitar traslapes entre las ráfagas de tráfico y durante éste no se transmite ningún tipo de información. La longitud de las ráfagas de tráfico depende de la cantidad de información que transportan, éstas se forman de un preámbulo y un campo de datos, el cual es el que contiene la información. Las estaciones que están transmitiendo pueden utilizar una o mas ráfagas de tráfico en un marco TDMA. El número de bits en el campo de datos (B_d) de una ráfaga de tráfico para un marco TDMA de longitud L_m (segundos) para una estación transmitiendo a una tasa de T_s bits/s [Feher, 1981] debe ser:

$$B_d = T_s L_m \quad (1)$$

Si la tasa de transmisión TDMA es T_t , entonces la duración del campo de datos (L_d) de la ráfaga de tráfico es:

$$L_d = T_s L_m / T_t \quad (2)$$

El número total de bits en el marco TDMA (B_t) se compone de los bits en el campo de datos (B_m) más el preámbulo, las ráfagas de referencia y los tiempos de guarda, de manera que:

$$B_t = T_t L_m \quad (3)$$

La longitud de los marcos TDMA se elige en base a los requerimientos en cuanto a velocidades de transmisión, tamaño de paquetes y susceptibilidad al retardo del tráfico transmitido, generalmente se seleccionan longitudes entre 0.75 y 20 ms [Spilker, 1977], utilizando usualmente múltiplos de 125 μ s, el cual es el período de muestreo PCM (Pulse code modulation) para el caso de voz digital.

Las capacidades de almacenamiento de datos digitales y el mantenimiento exacto de sincronización ha hecho que TDMA sea una técnica de acceso práctica y resulta muy flexible en la transmisión de paquetes, como es el caso de ATM, por lo que es la técnica de acceso múltiple utilizada en este trabajo de investigación.

III. REDES DE BANDA ANCHA: ATM

III.1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones de banda ancha ofrecen actualmente el potencial para transportar servicios con características muy variadas a altas velocidades. Son el soporte para que las aplicaciones puedan incluir tanto voz, video y datos ya que permiten la convergencia de todos los servicios en el medio de transmisión. Entre las tecnologías desarrolladas se encuentran: Frame Relay, Servicio de Datos Síncrono Multimegabit (SMDS, Synchronous Multimegabit Data Service) y el Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, Asynchronous Transfer Mode). Estas tecnologías también han sido definidas como servicios rápidos de paquetes (Fast Packet Services), por el hecho de estar diseñadas como infraestructuras de banda ancha [Horak, 2000].

El trabajo desarrollado en esta tesis se basa en la utilización de la tecnología ATM, por lo que en este capítulo se describe el funcionamiento básico de ésta, aclarando que no es la única tecnología de banda ancha existente.

III.2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE ATM

ATM es una tecnología de conmutación de paquetes orientada a conexión, para lo cual utiliza circuitos virtuales. Esto consiste en que antes de iniciar la transferencia de información es necesario determinar cual será el camino que seguirán los paquetes, por lo que primero se envía un paquete con información referente al destino del mismo, a partir

del cual se determina la ruta, estableciendo de esta manera el circuito que seguirán todos los paquetes hacia ese destino. Esto garantiza que los paquetes se recibirán de manera ordenada ya que todos siguen la misma ruta. Este circuito sólo es válido durante el tiempo que dura la transferencia por lo que se denomina circuito virtual. En terminología ATM, la fase de conexión, es decir el establecimiento del circuito virtual, se conoce como señalización [Peterson y Bruce, 1996].

La principal característica de ATM es que los paquetes a transmitir son de longitud fija. La longitud de cada uno es de 53 bytes, 5 bytes de encabezado seguidos de 48 bytes de información de usuario. Para distinguir estos paquetes de longitud fija de los paquetes normales utilizados en otras tecnologías de redes, que utilizan paquetes de longitud variable, se les denomina celdas.

La longitud fija de las celdas da algunas ventajas claves en comparación con el uso de la tecnología de paquetes. La primera es que se facilita la tarea que deben realizar los dispositivos de conmutación ya que las celdas pueden ser conmutadas de manera más rápida y económica conociendo de antemano el tamaño de cada una. Otra ventaja importante se relaciona con el comportamiento de las colas que deben implementarse en estos dispositivos, aspecto que se describe más adelante en este capítulo.

La figura 3 muestra el diagrama general de una red ATM, donde pueden distinguirse los elementos básicos de ésta. Los conmutadores ATM se encargan de atender a los diferentes servicios de voz, datos y video. Las estaciones ATM segmentan los paquetes de cada

servicio en celdas ATM, agregando los bits correspondientes en el encabezado. Puede observarse que para este caso se considera en la capa física una red de transporte Sonet/SDH, por lo que en la sección III.6 se describe la operación básica de esta tecnología.

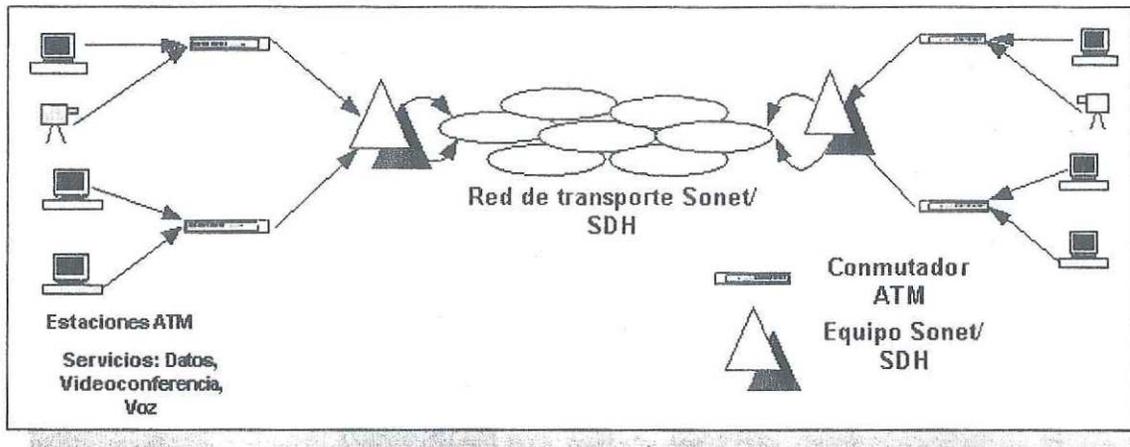


Figura 3. Red ATM

III.2.1 FORMATO DE CELDA ATM

Realmente se tienen dos formatos diferentes de celdas ATM. Uno de ellos se utiliza cuando la transferencia de celdas es entre una terminal o servidor y un conmutador, y se le conoce como formato de UNI (User-Network Interface). El otro formato es el que se utiliza para transmitir celdas de conmutador a conmutador en la NNI (Network-Network Interface). El formato UNI se muestra en la figura 4. La única diferencia con el formato NNI es que en este se reemplaza el campo GFC con 4 bits más para el VPI.

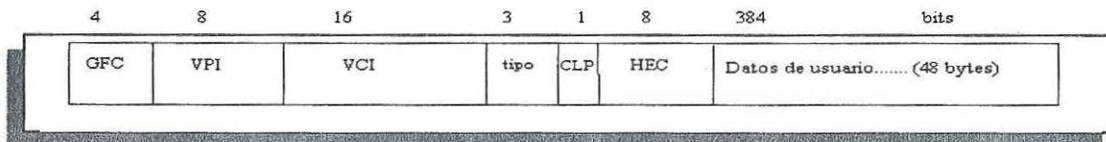


Figura 4. Formato de celda ATM

Los campos dentro de la celda ATM, son:

GFC (Generic Flow Control) . La función de este campo aún no está definida, debido a esto se le conoce como genérico, siendo utilizado por cada equipo para la función específica que se le designe. Se le ha asignado un campo de 4 bits de extensión.

VPI (Virtual Path Identifier). Es el identificador de ruta virtual, es el número que identifica la ruta virtual que se utiliza. Consiste en un campo de 8 bits de extensión.

VCI (Virtual Channel Identifier). Es el identificador de canal virtual, es decir el número que identifica al canal virtual que se emplea. Consiste en un campo de 16 bits de extensión.

Tipo o PTI (Payload Type Identifier). Este campo determina el tipo de información que se transporta como carga efectiva en la celda. Esta información puede ser de usuario o de administración de la red. Este campo es de 3 bits de extensión.

CLP (Cell Loss Priority). Es el campo de Prioridad de Pérdida de Celda. Con el fin de mantener condiciones óptimas en la red, las celdas pueden o no ser descartadas. Por medio de este campo de un bit se conoce si la celda tiene una prioridad alta y por tanto no puede descartarse (CLP = 0) o si es factible de ser descartada en caso que la red lo requiera (CLP = 1).

HEC (Header Error Control). Campo de Control de Error en el Encabezado. Se utiliza para la verificación de errores en los campos del encabezado. Cada celda calcula el valor de HEC en base a los 5 campos anteriores. Este campo es procesado por la capa física, por lo que es útil para determinar la calidad del enlace y tiene una extensión de 8 bits.

Datos de usuario. Los datos de usuario ocupan el campo restante, después del encabezado, en una celda ATM. Tiene una extensión de 384 bits y se compone de la información efectiva del usuario, así como de los campos que hayan sido agregados en las capas ATM encargadas del proceso de segmentación, como se describe más adelante en este capítulo.

III. 3 CALIDAD DE SERVICIO EN ATM

Una de las características importantes de ATM es que incluye servicios para garantizar un nivel óptimo de calidad de servicio a las aplicaciones que atiende. El foro ATM¹ y la ITU-T² se han encargado de desarrollar los estándares de manera que las redes ATM cumplan con esta característica. El foro ATM establece seis categorías de servicio, cada una de las cuales es definida en base a un conjunto de parámetros de calidad de servicio y a un contrato de tráfico. Este contrato es un conjunto de parámetros que determinan cuales deben ser las características del tráfico generado por las fuentes. Los parámetros de calidad de servicio (QoS) definen los objetivos de desempeño de la red requeridos por el tráfico transportado. La red garantiza el cumplimiento de estos parámetros siempre que el tráfico cumpla con lo establecido en el contrato, de no ser así la red no necesariamente cumplirá con los objetivos de QoS establecidos.

¹www.atmforum.com

² www.itu.org

III.3.1 PARÁMETROS DE TRÁFICO

Como se menciona anteriormente, los parámetros de tráfico definen básicamente las características inherentes de las fuentes. Estos parámetros se describen a continuación [Foro ATM, 1999]:

- **Tasa de Celdas Pico (PCR, Peak Cell Rate)** : Es el número máximo de celdas por segundo generadas en una ráfaga que la red se compromete a aceptar y transmitir. No debe exceder la tasa de datos del medio físico; por ejemplo en una línea STM-1 de SDH no será posible exceder 149.76 Mbps o 353,207 celdas por segundo. En otras palabras, es la rapidez máxima con la que el transmisor planea enviar las celdas a la red.
- **Tasa de Celdas Sostenida (SCR, Sustained Cell Rate)** : Es la tasa promedio máxima a la que la red se compromete a aceptar celdas y transmitir las hacia el otro extremo. La tasa promedio de datos se define como el número de celdas transmitidas en el enlace por la duración de la conexión y no debe exceder el PCR. Dicho de otra manera, es la tasa esperada o requerida de celdas promediada en un intervalo de tiempo. Para el servicio de tasa constante de bit (CBR) esta tasa es igual que PCR, pero para otros servicios es mucho menor.
- **Tamaño máximo de ráfaga (MBS, Maximum Burst Size)**: Es el tamaño máximo, expresado en celdas, de una ráfaga de tráfico que puede ser transmitido. Es el número

máximo de celdas consecutivas que pueden ser transmitidas. Por ejemplo, si se tienen transmisiones de paquetes de 2358 bytes, estos en celdas ATM equivalen a 50, el cual debe ser el valor de MBS en tal caso.

- **Tasa mínima de celdas (MCR, Minimum Cell Rate):** Es el número mínimo de celdas por segundo que la red acepta transportar, definiendo de esta manera el mínimo de ancho de banda garantizado en todo momento dentro del canal virtual.

El conjunto de estos parámetros relacionados a las características de una fuente se conoce como Descriptor de Tráfico, el cual, junto con otro parámetro conocido como Tolerancia en la variación del retardo de celdas (CDVT, Cell Delay Variation Tolerance) caracteriza una conexión ATM. El CDVT indica la máxima tolerancia en la variación del retardo que puede haber en los tiempos de transmisión e interarribo de las celdas entre dos o más conexiones ATM.

III.3.2 PARÁMETROS DE CALIDAD DE SERVICIO

En la recomendación I.356 de la ITU-T [ITU, 2000] se encuentran las definiciones de los parámetros de desempeño o QoS de la transmisión de celdas en redes ATM, por lo tanto estos son medidos en el extremo receptor. Descritos brevemente son:

- **Relación de Celdas Erróneas (CER, Cell Error Ratio).** Se refiere a la medida de las celdas que son recibidas con error del total de celdas transmitidas durante un intervalo de tiempo.
- **Relación de Bloques de Celdas Severamente Dañados (SECBR, Severely Errored Cell Block Ratio).** Es el total de bloques de celdas severamente dañados en relación al total de bloques de celdas que fueron transmitidos. Un bloque de celdas es una secuencia de N celdas transmitidas consecutivamente en una conexión. Se considera que un bloque está severamente dañado cuando contiene más de M celdas erróneas, perdidas o mal insertadas. Los valores de N y M dependen de la tasa de bits y se especifican en I.356, tabla 1.
- **Tasa de Celdas Mal Insertadas (CMR, Cell Misinsertion Rate).** Es el número total de celdas mal insertadas durante un tiempo determinado dividido entre el tiempo de duración del intervalo muestreado [ITU, 2000]. Este parámetro se especifica como una tasa, a diferencia de los anteriores, establecidos como una relación, debido a que se establece con referencia a un intervalo de tiempo. Una celda mal insertada se define como aquella que es recibida en un destino, pero que no haya sido enviada hacia él, esto es, que haya sido mal direccionada. Estos problemas pueden ocurrir debido a errores en el encabezado de la celda.
- **Retardo en la Transferencia de Celdas (CTD, Cell Transfer Delay).** Es el tiempo promedio en el que una celda llega desde la fuente hacia el destino. En este tiempo se

incluyen todos los retardos que la celda atraviesa en la red, los cuales incluyen el tiempo de propagación, codificación y procesamiento, como se mencionará más ampliamente en el capítulo IV. Si una celda llega demasiado tarde, con referencia a un retardo máximo (maxCTD) previamente establecido, ésta debe ser descartada. Si esta celda forma parte de un paquete mayor, todo el paquete debe ser desechado.

- **Variación de Retardo de Celdas (CDV, Cell Delay Variation).** Es la diferencia entre el CTD experimentado y un valor CTD anterior para una celda en particular. También se conoce como jitter, el cual puede degradar de manera importante servicios como voz y video. En otras palabras, el CTD mide la uniformidad con que se entregan las celdas.
- **Relación de Celdas Perdidas (CLR, Cell Loss Ratio).** Es una medida de las celdas que se perdieron del total que fueron transmitidas. Una celda puede perderse debido a varias razones, como problemas de congestión que provoquen que las celdas sean descartadas o si alguna estación excede su PCR, lo que es otra razón para descartar celdas, al igual que exceder el CTD permitido.

Los primeros tres parámetros (CER, SECBR y CMR) no pueden ser negociados, es decir, no existe un compromiso entre el valor del parámetro de tráfico y el de calidad de servicio garantizado, mientras que los 3 últimos (CTD, CDV y CLR) sí pueden negociarse.

III.3.3. CATEGORÍAS DE SERVICIO

Las categorías de servicio definidas por el Foro ATM en la Especificación de Administración de Tráfico versión 4.1 [Foro ATM, 1999] para el transporte de celdas, descritas en forma breve son:

- **Tasa Constante de Bit (CBR, Constant Bit Rate).** Es una clase de servicio que da soporte a voz y video sin compresión en aplicaciones de videoconferencias, audio interactivo así como telefonía. El tráfico CBR se caracteriza por una tasa o flujo de datos constante, esto significa que requiere tener disponible una cantidad constante de ancho de banda, definida por el PCR. Los parámetros de Calidad de Servicio para CBR son: CLR, CDV y CTD. Dado que se establece como intolerante al retardo se requieren valores de CDV y CTD muy pequeños.
- **Tasa Variable de Bit en tiempo real (rt-VBR, real-time Variable Bit Rate).** En este caso el tráfico se presenta a ráfagas, es decir varía su tasa de datos, como sucede con el video y voz comprimida con supresión de silencios. Los parámetros de tráfico que definen las características de la fuente son PCR, SCR y MBS. Este servicio, al igual que CBR, resulta muy afectado por retardos grandes, y los parámetros de calidad de servicio son CLR, CDV y CTD.

- **Tasa Variable de Bit no en tiempo real (nrt-VBR, non real-time Variable Bit Rate).** En este caso el tráfico también se presenta a ráfagas como el servicio rt-VBR, solo que no tiene la característica de tiempo real, por lo que no es dependiente de retardos, debido a que se tiene tiempo para recuperar la información. Un ejemplo de este tipo de servicio es la distribución de video y voz codificada no transmitida en tiempo real. Los parámetros de tráfico que lo caracterizan son PCR, SCR y MBS, y el parámetro de calidad de servicio es CLR.
- **Tasa de bit no especificada (UBR, Unspecified Bit Rate).** Es una categoría de servicio conocida como de mejor esfuerzo, para la que no se garantiza ningún parámetro de calidad de servicio. En esta categoría se encuentran el correo electrónico y la transferencia de archivos remotos. Sus parámetros de tráfico son PCR y CDVT.
- **Tasa de datos Disponible (ABR, Available Bit Rate).** En esta categoría la red puede variar el ancho de banda ofrecido, basándose en la utilización de este recurso por parte de las otras categorías, es decir, es aplicable a fuentes que pueden variar su tasa de datos en base a los requerimientos de la red, como es el caso de aplicaciones no en tiempo real como: transferencia de datos, llamadas a procesos remotos, servicios de distribución de archivos, entre otras. Los parámetros de tráfico son PCR y MCR, que son los valores entre los que varía el ancho de banda, de manera que nunca será menor de MCR. La determinación de esta variación se realiza a través de un mecanismo de

control de flujo conocido como Recurso de Administración de celdas (RM-cells, Resource Management Cells). No se establecen parámetros de calidad de servicio.

- **Tasa de Marco Garantizada (GFR, Guaranteed Frame Rate).** Es una nueva categoría de servicio diseñada para aplicaciones no en tiempo real que está basada en UBR pero que garantiza una tasa de datos mínima a las conexiones. Es aplicable para fuentes que requieren una garantía mínima de ancho de banda. Los parámetros de tráfico son PCR, MCR, MBS y un tamaño máximo de marco (MFS, Maximum Frame Size).

III. 4 MODELO DE CAPAS ATM

Debido a que ATM está orientado a la conmutación de celdas de tamaño fijo, esta tecnología corresponde a las capas Física y de Enlace de Datos, al ubicarse en el Modelo de referencia OSI (Open systems Interconnection), es decir capas 1 y 2, como se muestra en la figura 5.

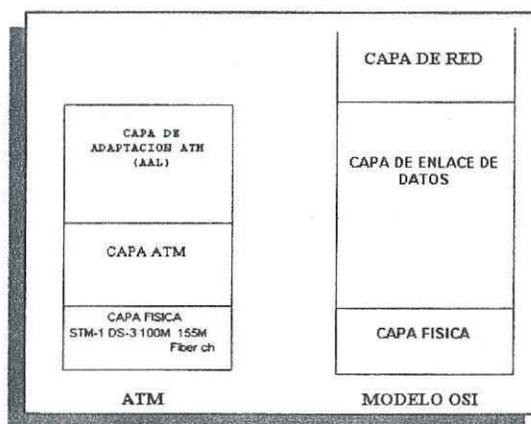


Figura 5. Comparación de los modelos de capa de ATM y OSI

En base al modelo de capas de ATM, se pueden observar tres capas: Física, Capa de Adaptación ATM conocida como AAL (ATM Adaptation Layer) y la Capa ATM [Lenhard, 1995].

III.4.1 CAPA FÍSICA ATM

Esta capa corresponde en sus funciones a la Capa Física del modelo de referencia OSI, ya que se relaciona con la transmisión de la información, en este caso celdas, sobre los medios físicos que conectan dos dispositivos ATM incluyendo los aspectos eléctricos, mecánicos y funcionales requeridos para acceder el enlace físico. Esta capa, a su vez, se forma de dos subcapas. La primera es la Subcapa de Convergencia de Transmisión (Transmission Convergence) la cual transforma el flujo de celdas en un flujo constante de bits y bytes para su transmisión sobre el medio físico. La segunda es la Subcapa Dependiente del Medio Físico, la cual define los parámetros al nivel más bajo, tales como velocidad de bit en el medio, entre otros. En general ATM no especifica exactamente las reglas para la transmisión física de las celdas, sino que determina que éstas pueden ser transportadas por un cable o por fibra óptica, o que pueden ser empaquetadas dentro de la carga útil de otros sistemas. Tal es el caso de SDH, tecnología descrita más adelante en este capítulo. De esta manera puede considerarse que ATM fué diseñado para que sea independiente del medio de transmisión [Gi, 1993].

III.4. 2 CAPA ATM

Esta capa define la estructura de los paquetes ATM introduciendo los 5 bytes de encabezado a las celdas de 48 bytes que contienen información provenientes de la capa de adaptación. La capa ATM realiza además la conmutación de las celdas a través de la red. Sus principales funciones por tanto son: Multicanalización y demulticanalización de celdas de diferentes conexiones dentro de una sola trama de celdas, agregar o extraer el encabezado ATM a las celdas antes o después de su transferencia de o hacia la capa de adaptación y llevar al cabo la conmutación de las celdas en base a la identificación de los campos VPI (Identificador de trayectoria virtual) y VCI (Identificador de canal virtual).

III.4. 3 CAPA DE ADAPTACION ATM (AAL, ATM ADAPTATION LAYER)

La capa de adaptación ATM se encarga de preparar la información, en base a los requerimientos específicos del servicio que se desee transportar, antes de pasar a la capa ATM donde se agregará el encabezado. Se divide en dos etapas: Subcapa de Convergencia, la cual se encarga de garantizar la secuencia, control de errores y el tamaño de la información que se requiere según el tipo de servicio y la Subcapa de Segmentación y Reensamble, la cual tiene como función dividir la estructura de información formada en la subcapa anterior en segmentos de 48 bytes para su procesamiento posterior.

Debido a que cada servicio tiene características diferentes y muy variadas, la ITU-T definió cuatro clases de servicio principales dentro de los cuales se pueden clasificar todos los demás, de esta forma también definió cuatro capas AAL para atender a estas clases de servicio, estas capas son AAL1, AAL2, AAL3 y AAL4, posteriormente, debido a que la

estructura de la capa AAL3 resultaba muy compleja se desarrollo la capa AAL5. La tabla II [Horak, 1999] muestra las principales características de las capas y clases definidas, así como las categorías de servicio de ATM mencionadas anteriormente.

Tabla II. Capa de adaptación ATM, categorías y clases de servicio [Horak, 1999].

Clase de Servicio ITU-T	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Clase X
Categoría de servicio del Foro ATM	CBR	rt-VBR	nrt-VBR	UBR	ABR
Tipo AAL	1	2	3/4, 5	3/4	5
Parámetros del contrato de tráfico	PCR y CDVT	PCR,CDVT, SCR y MBS	PCR, CDVT, SCR y MBS	PCR y CDVT	PCR y MCR
Parámetros de calidad de servicio	CDV, CTD y CLR	CLR, CTD y CLR	CLR		

Las capas AAL definidas muy brevemente [Lenhard, 1995] son:

➤ **AAL1**

Realiza las funciones necesarias para adaptar los servicios con tasas constantes de bit (CBR) a los servicios de la capa ATM. Estos servicios como voz y el video CBR así como la emulación de circuitos tienen aspectos en común como son que los bloques de datos aparecen en intervalos periódicos, es decir, conocidos. Se requiere que la información recibida en el nodo receptor llegue en el orden en que fue transmitida y son servicios que tienen una tolerancia mínima a la variación en los retardos de transmisión, definida como CDV (cell delay variation).

El protocolo de la capa AAL1 se muestra en la figura 6. Consiste en un solo encabezado AAL que se agrega a los 47 bytes de datos en que se segmenta cada paquete. La principal utilidad de este encabezado es proveer información de secuencia para monitorear más fácilmente celdas perdidas o en desorden. En sí, la única responsabilidad en esta capa es empaquetar los bits en celdas y desempacarlos al momento de recibirlos, acompañando cada bloque con un número de secuencia (SN, Sequency Number) y una protección para este número de secuencia (SNP, Sequency Number Protection) .

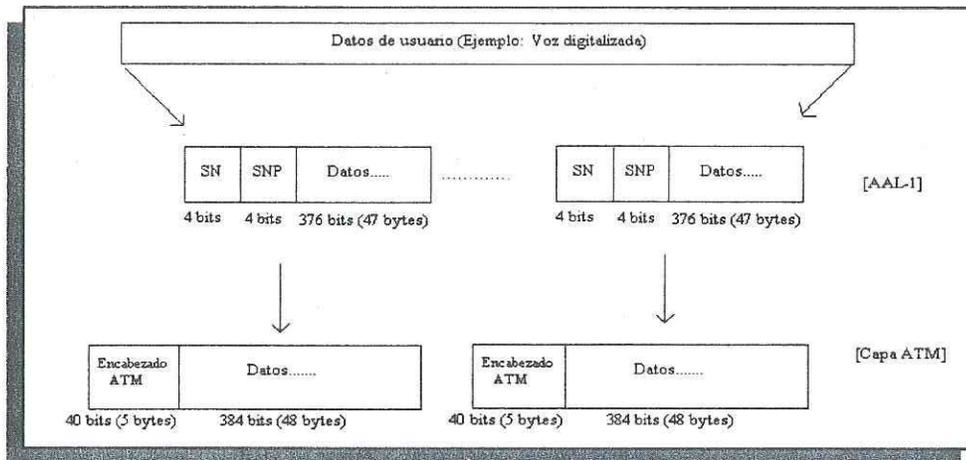


Figura 6. Funcionamiento de la capa AAL1

➤ AAL2

Esta capa es la más reciente agregada a la Capa de Adaptación ATM, fue diseñada con la finalidad de hacer más eficiente la utilización del ancho de banda durante la transmisión de paquetes de voz comprimida. Procesa cadenas de datos tal como la capa AAL-1, con la principal diferencia de que en este caso la información transmitida requiere una tasa de

transmisión variable, tal como voz y video comprimidos tipo VBR, los cuales requieren información de sincronización.

➤ AAL3/4

Inicialmente la capa AAL3 fue diseñada con la intención de dar servicio VBR para aplicaciones de datos orientados a conexión, y la capa AAL4 se diseñó para aplicaciones de datos no orientados a conexión, pero finalmente ambas capas se incorporaron en una sola. La capa AAL3/4 provee el transporte de tramas de longitud variable con detección de errores tanto para datos orientados a conexión (clase C) como para los no orientados a conexión (clase D). Ejemplos del tipo de información que atiende esta capa son las ráfagas de datos en interconexiones de redes de área local, así como los servicios de Internet. Este es tráfico con características similares en cuanto a transmisión en ráfagas y por lo tanto muy tolerante a la variación en el retardo.

➤ AAL5

Esta capa fue diseñada por el foro ATM con la finalidad de ofrecer el mismo servicio que la capa AAL3/4 pero de una manera más sencilla y eficiente, ofreciendo servicios para datos orientados a conexión con un encabezado menor que el requerido por la capa AAL3/4. De esta manera cumple con los requerimientos de los usuarios de redes de área local transmitiendo a altas tasas de información. A esta capa también se le conoce como SEAL (Simple and Efficient Adaptation Layer) o Capa de Adaptación Simple y Eficiente.

III. 5 CONMUTADORES EN ATM

Los conmutadores son dispositivos de gran importancia dentro de una red ATM. Estos son los encargados de llevar al cabo la tarea de enviar las celdas recibidas hacia el destino apropiado en base a los campos VPI y VCI de la celda ATM.

III.5. 1 OPERACIÓN DE LOS CONMUTADORES ATM

Como ya se ha mencionado, ATM es una tecnología orientada a conexión, garantizando que los paquetes serán recibidos en el orden en el que fueron enviados. Una vez establecida una conexión todas las celdas tomarán el mismo camino, llamado trayectoria virtual. El conmutador debe encargarse de dirigir las celdas apropiadamente, además de monitorear y mantener la integridad de la secuencia de celdas de manera que la reconstrucción de los paquetes no tenga problemas en el destino. Dentro de una red ATM una celda puede pasar por varios conmutadores. El VCI contiene un valor específico para cada conmutador, ya que está relacionado con el número de puerto correspondiente para éste, que no necesariamente será el mismo en el siguiente conmutador. Por lo tanto cuando una celda llega a un conmutador, éste debe realizar la traslación adecuada del VCI de acuerdo a sus propios valores, así como realizar el cálculo correspondiente del campo HEC en la celda, ya que la información en el encabezado será modificada.

Aún cuando ATM es una tecnología asíncrona, los conmutadores operan con un esquema síncrono. En base a la velocidad de operación se determina el tiempo en que cada celda será tomada, si es que ha llegado alguna, pasándola posteriormente a la estructura de conmutación [Tanenbaum, 1997] para transmitirla hacia el puerto de salida, como muestra la figura 7.

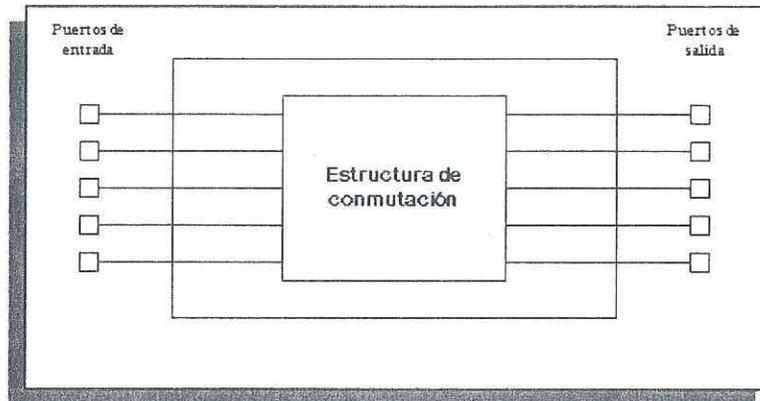


Figura 7. Esquema básico de un conmutador ATM

Las celdas llegan de manera asíncrona, sin embargo son atendidas por el conmutador hasta que el tiempo establecido para ello se cumple, en base a su reloj interno. Por lo tanto puede considerarse que la conmutación se realiza en base a dos aspectos. Primero en espacio, al establecer la conexión desde cada puerto de entrada hacia los de salida, en base a la estructura de conmutación. Ésta determina como estarán internamente las conexiones de manera que todos los puertos de entrada y salida se conecten entre sí. El segundo aspecto es en base al tiempo de conmutación, ya que las celdas que llegan en varios tiempos desde diferentes entradas pueden ser entregadas a la salida en ranuras de tiempo diferentes a las de entrada, debido a que no hay en ATM un identificador de tiempo, esto hace posible que lleguen simultáneamente dos celdas dirigidas hacia la misma salida, lo que podría causar

problemas de contención o de descarte de celdas. Esto no sucede debido a que se introducen colas de espera en localidades de memoria, conocidas como buffers, en el sistema del conmutador.

III.5.2 MÉTODOS DE COLAS DE ESPERA (BUFFERS) EN CONMUTADORES ATM

Un conmutador puede tener un conjunto de colas o una sola dependiendo del método utilizado, que puede ser una de tres variantes: Buffers de entrada, de salida o central [Peterson y Bruce, 1996].

- **Buffers de entrada.** En este caso los buffers son colocados en los puertos de entrada, correspondiendo uno a cada puerto. Las celdas pueden ser atendidas mediante un esquema FIFO (First In, First Out), es decir, el primero que llega es el primero en ser procesado. Pueden presentarse colisiones cuando dos o más celdas que se encuentren en la cabecera de su respectiva cola compitan por el mismo puerto de salida. En tal caso todas las celdas que se encuentren atrás de esta celda bloqueada tendrán que esperar hasta que ésta sea liberada, incluso cuando estén dirigidas a puertos de salida diferentes y estos se encuentren desocupados. Este método de almacenamiento presenta el peor desempeño en cuanto al tamaño de buffer requerido para evitar pérdidas significativas, en comparación a los otros métodos.

- **Buffers de salida.** En esta técnica los buffers se colocan en los puertos de salida del conmutador. De esta manera es posible que celdas provenientes de diferentes entradas pasen por la estructura de conmutación y lleguen a las salidas en donde son almacenadas en el puerto que les corresponde si es que se requiere. Este método requiere que la estructura de conmutación opere a altas velocidades y además, con el fin de evitar bloqueos, que las interconexiones de red y los buffers de los puertos de salida sean capaces de manejar N celdas simultáneamente, cuando el número de puertos de entrada es N .
- **Buffer central.** En este caso los buffers no están dedicados a un solo puerto de entrada o de salida, sino que son compartidos por todos. Cada celda que llega al conmutador es almacenada directamente en el buffer donde son atendidas mediante un esquema FIFO identificando el puerto de salida correspondiente al que serán dirigidas. Con relación al tamaño de cola requerido este método resulta el más eficiente ya que requiere la menor capacidad de almacenamiento en comparación con los anteriores para evitar pérdidas significativas de celdas por bloqueo en condiciones de cargas altas. Como desventaja tiene que se requieren funciones más complejas en el buffer para procesar las celdas.

III.5.3. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN CONMUTADORES ATM

El desempeño de un conmutador puede ser evaluado en cuanto al comportamiento exhibido en cualquiera de sus siguientes parámetros:

- **Bloqueo.** Puede definirse como la probabilidad que no se encuentren recursos disponibles para permitir que se establezcan conexiones simultáneas entre todos los puertos de entrada y de salida, lo que puede suceder debido a que se presente tal cantidad de tráfico que se excedan las capacidades del sistema.
- **Pérdida de celdas y celdas mal direccionadas.** Como se menciona anteriormente, es posible que en un conmutador se pierdan celdas que lleguen a un buffer que ya se encuentre lleno y por lo tanto deban ser descartadas. En ATM el intervalo típico de probabilidad de pérdida de celdas es 10^{-8} a 10^{-10} . Otra posible causa de pérdida de celdas es por que éstas sean mal direccionadas por el conmutador, lo que significa que sean enviadas a un puerto de salida que no les corresponda, debido a errores que hayan afectado el campo de dirección. En tal caso una celda mal direccionada provocará un error doble, ya que no se recibe la celda en el lugar que corresponde y además se tiene una celda en un punto al que no fue dirigida. Los elementos de conmutación deben diseñarse de manera que la probabilidad de celdas mal insertadas sea 1000 veces mejor que la de celdas perdidas.

- Capítulo 11
- **Retardo de conmutación.** Este retardo depende del tiempo de procesamiento que deba dar el conmutador a las celdas en base a la estructura de conmutación y al método de almacenamiento utilizado, el cual además depende del tamaño del buffer utilizado. Un buffer pequeño puede garantizar retardos bajos, sin embargo se llena pronto y aumenta la probabilidad de pérdida de celdas.

III.6 JERARQUÍA DIGITAL SÍNCRONA (SDH, Synchronous Digital Hierarchy)

Las tecnologías SONET (Synchronous Optical Network, Red óptica síncrona) y SDH (Synchronous Digital Hierarchy, Jerarquía digital síncrona) son un conjunto de estándares para comunicaciones de banda ancha sobre fibra óptica ampliamente utilizados a nivel mundial, esto hace posible que los fabricantes diseñen equipos que permitan un interconectividad y una interoperabilidad completa entre ellos [Gi, 1993].

SONET/SDH describen las características físicas de una infraestructura de fibra óptica manera que proporciona una base para la transmisión de servicios de ATM, consisten básicamente en el medio de transporte para las celdas a través de la capa física.

SONET fue el primer estándar desarrollado por el Instituto Americano de Normas (ANSI, American National Standards Institute) para fibra óptica con la finalidad de establecer las bases para que las compañías telefónicas llevaran al cabo trabajos

- *Retardo de conmutación.* Este retardo depende del tiempo de procesamiento que deba dar el conmutador a las celdas en base a la estructura de conmutación y al método de almacenamiento utilizado, el cual además depende del tamaño del buffer utilizado. Un buffer pequeño puede garantizar retardos bajos, sin embargo se llena pronto y aumenta la probabilidad de pérdida de celdas.

III.6 JERARQUÍA DIGITAL SÍNCRONA (SDH, Synchronous Digital Hierarchy)

Las tecnologías SONET (Synchronous Optical NETWORK, Red óptica síncrona) y SDH (Synchronous Digital Hierarchy, Jerarquía digital síncrona) son un conjunto de estándares para comunicaciones de banda ancha sobre fibra óptica ampliamente utilizados a nivel mundial, esto hace posible que los fabricantes diseñen equipos que permitan una interconectividad y una interoperabilidad completa entre ellos [Gi, 1993].

SONET/SDH describen las características físicas de una infraestructura de fibra óptica, de manera que proporciona una base para la transmisión de servicios de ATM, consistiendo básicamente en el medio de transporte para las celdas a través de la capa física.

SONET fue el primer estándar desarrollado por el Instituto Americano de Normalización (ANSI, American National Standards Institute) para fibra óptica con la finalidad de establecer las bases para que las compañías telefónicas llevaran al cabo transmisiones

digitales sobre enlaces de fibra óptica. SDH es el estándar internacional que es diferente a SONET en muy pocos detalles, por lo en esta sección se describe únicamente SDH y de manera muy básica, aclarando que ambos estándares son mucho más complejos que lo presentando aquí.

SDH o Jerarquía Digital Síncrona, como su nombre lo indica, es una técnica de transmisión síncrona estandarizada por la ITU-T (anteriormente CCITT) como el método de transmisión física para redes de comunicaciones ópticas, incluyendo ATM. En los estándares G.707, G.708 y G.709 se definen sus características básicas como son velocidad de transmisión, formato de las señales, estructuras de multicanalización, entre otras. SDH se basa en la multicanalización, por lo cual los formatos establecidos para la transferencia de la información permiten incluir varias señales, definidas como tributarias, las cuales son multicanalizadas en ellos. De esta manera es posible transportar o multicanalizar varios enlaces de velocidades bajas en uno solo de alta velocidad.

En la figura 8 se muestra la estructura de multicanalización, esto es la manera en que las tributarias son incluidas en el módulo utilizado en SDH conocido como STM (Synchronous Transport Module).

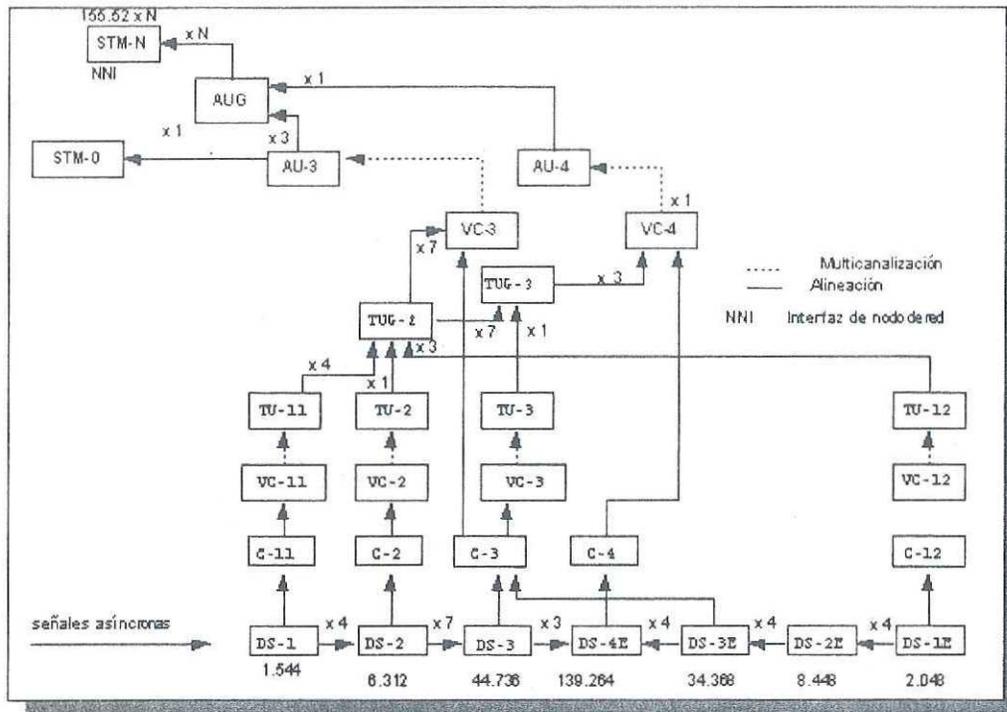


Figura 8. Estructura de multicanalización síncrona

Un Contenedor virtual (VC, Virtual Container) es una estructura de información formada por carga útil con su encabezado de trayectoria (POH, Path OverHead) [Gi, 1993]. Es la parte del módulo que contiene la información de usuario. La tabla III muestra la carga útil de diferentes contenedores virtuales.

Tabla III. Carga útil de los contenedores virtuales en SDH

Contenedor Virtual	Carga útil (Mbps)
VC-11	1.544
VC-12	2.048
VC-2	6.312
VC-3	44.736
VC-4	139.264

En la figura 8 puede observarse la secuencia de formación de los módulos SDH. En la primera etapa de la multicanalización cada tributaria es relacionada a un contenedor correspondiente (C, Container). Si se agrega un encabezado de trayectoria (POH) se convierte en un contenedor virtual (VC). Al agregar a un VC un apuntador se genera una unidad tributaria (TU, Tributary Unit), pero si este VC se traslada a un módulo STM-1 sin pasar por otro VC, la TU se conoce como unidad administrativa (AU, Administrative Unit). Si se unen varias TU entonces se tiene un grupo de unidades tributarias (TUG, Tributary Unit Group) y un grupo de unidades administrativas (AUG, AU Group) junto con un encabezado de sección (SOH, Section OverHead) forman un módulo STM-N.

Como puede observarse en la figura 8, al VC se le agregan varios apuntadores o encabezados, hasta formar la estructura básica o STM-1. Es posible contener varios módulos STM en módulos de orden superior STM-N, así como se incluyen varios VC's en ellos, mediante el principio de multicanalización y en base a esto alcanzar mayores velocidades de transmisión, como lo muestra la Tabla IV.

Tabla IV. Jerarquía de señales en SDH

STM	Tasa de datos (Mbps)	Información de usuario (Mbps)
STM-1	155.52	149.76
STM-3	466.56	449.28
STM-4	622.08	599.04
STM-6	933.12	898.56
STM-8	1244.16	1198.08
STM-12	1866.24	1797.12
STM-16	2488.32	2396.16

El módulo básico SDH (STM-1) mostrado en la figura 9. es un bloque de 2430 bytes, que se puede denominar marco SDH, los cuales se emiten cada 125 μ s, de esta manera se generan 8000 marcos/s. Para describir estos marcos pueden definirse como un rectángulo de bytes con 270 columnas x 9 filas para tener un total de $2430 \times 8 = 19440$ bits, que al transmitirse cada 125 μ s nos dan la velocidad de transmisión de 155.52 Mbps. De estos bytes 2349 corresponden a carga útil, o sea 149.76 Mbps de información de usuario. En la figura 9 puede observarse que el SOH se compone de dos particiones de 3×9 y 5×9 bytes respectivamente. El encabezado de AU se compone de 1×9 bytes. Los octetos restantes están reservados para la carga útil del STM-1, dentro de la cual es posible transportar un VC-4, que a su vez se forma de la carga efectiva y un POH de 9×1 bytes [Gi, 1993].

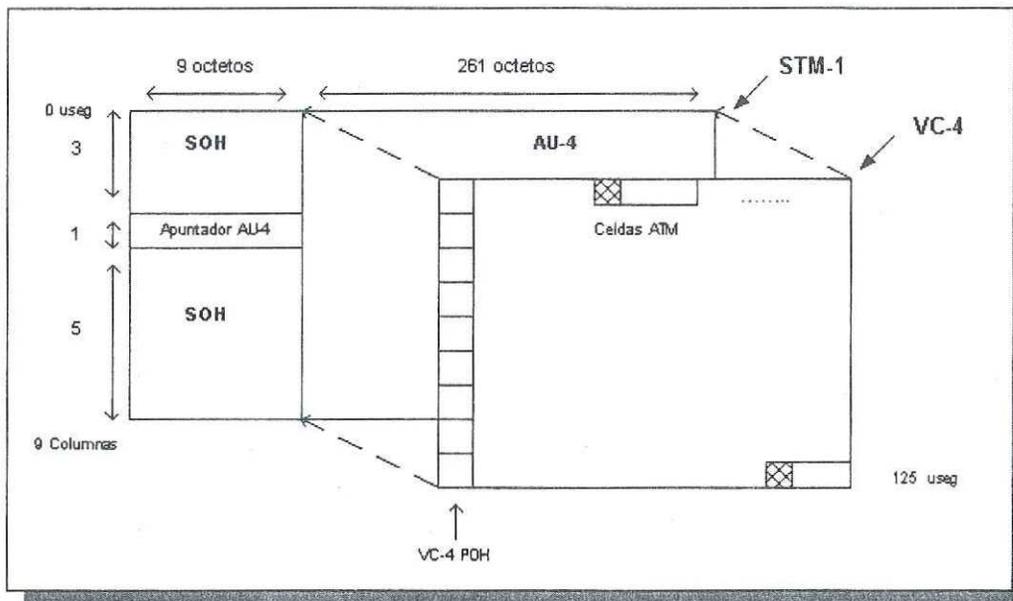


Figura 9. Módulo de transporte síncrono básico (STM-1)

La adaptación de las celdas ATM dentro de la carga útil del marco SDH se realiza alineando los octetos de la estructura del contenedor virtual con los octetos de cada celda.

Debido a que la capacidad del contenedor virtual utilizado puede no ser múltiplo entero de la longitud de las celdas ATM, se permite que una celda cruce los límites del contenedor. Esta alineación no es una tarea simple, ya que la información de usuario de cada celda primero es mezclada antes de ser introducida al VC mediante la utilización del mezclado auto síncrono (SSS, Self-synchronous scrambling) que se basa en el polinomio característico $x^{43} + 1$, de manera que una celda ATM pueda ser insertada en un contenedor virtual y posteriormente pasar a la multicanalización síncrona. La explicación de estos procesos así como la información acerca de los encabezados y estructura más detallada de SDH se encuentra fuera de los objetivos del presente trabajo por lo que se recomienda consultar los estándares de la ITU-T antes mencionados para mayores referencias.

Cabe mencionar que las estructuras presentadas en esta sección, tales como el módulo STM-1, son estándares desarrollados como se ha mencionado para el transporte de celdas ATM por fibra óptica. En este trabajo se contempla como medio físico el canal satelital, por lo que el módulo STM-1 no resulta ser el más óptimo sobre todo por el ancho de banda requerido. En el siguiente capítulo se aborda este tema con mayor detalle. El objetivo de esta sección fue sólo dar a conocer las bases del funcionamiento de SDH.

El presente trabajo se desarrolló pensando en la interconexión de redes ATM por satélite con el fin de establecer servicio telefónico, aunque las características presentadas en las siguientes secciones de este capítulo pueden extenderse a todos los servicios soportados por ATM. En la sección IV.5 se presentan las consideraciones y características básicas contempladas en esta tesis sobre el tráfico telefónico.

IV.2. INTERCONEXIÓN DE REDES ATM POR SATÉLITE

La finalidad de implementar una red de cobertura amplia por satélite es aprovechar las ventajas que ofrecen los satélites específicamente en cuanto a cobertura y flexibilidad, pero sin que la red sufra las consecuencias de los aspectos degradantes del enlace, principalmente debido a retardos y efectos de propagación. El diseño de redes de banda ancha por satélite debe considerar tanto los aspectos comunes de tecnologías de redes terrestres así como los relacionados con el diseño de comunicación satelital, siendo necesario elegir los primeros de manera que resulten los más adecuados para funcionar en las condiciones de los segundos o, en determinado caso, adaptarlos para que sea así. En los capítulos II y III se mencionan ambas tecnologías, sistema satelital y ATM, de manera independiente. En esta sección se presentan los requerimientos técnicos que deben considerarse para lograr la integración de ambas tecnologías.

IV.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA SATELITAL

Estos requerimientos se refieren a los aspectos que conforman un sistema satelital, presentados más ampliamente en el capítulo II, y que de manera general son:

- ***Banda de frecuencia a utilizar:*** La banda de frecuencia (C, Ku, Ka) en la que será transmitida la señal, la cual presenta características determinantes a considerar en el enlace satelital. Para la interconexión de ATM por satélite, banda Ka es muy conveniente, ya que es la que ofrece mayor ancho de banda, permite utilizar componentes de menor tamaño y no se encuentra tan saturada como banda C y Ku, por lo que se reduce el riesgo de interferencias.
- ***Estación terrena:*** Las características de la estación terrena están muy relacionadas con la banda de frecuencia elegida. Los aspectos determinantes son: potencia de transmisión, ganancia de la antena, diámetro del plato reflector de la antena, entre otros. Para el caso de telefonía sobre ATM se considera la utilización de estaciones VSAT con topología en malla.
- ***Tipo de satélite:*** El efecto principal del tipo de satélite (LEO, MEO o GEO) elegido es el retardo de propagación que éste introduce al enlace. La interconexión satelital de ATM puede llevarse al cabo tanto por medio de satélites LEO como GEO, sin embargo estos últimos son mas ampliamente utilizados.

- **Técnica de modulación:** La técnica de modulación es un aspecto determinante de la capacidad de transmisión del enlace. Principalmente se emplean técnicas de modulación de fase de baja eficiencia espectral (BPSK, QPSK), ya que son más eficientes en potencia y su implementación es sencilla. Se espera que en un futuro próximo se usen técnicas de modulación de mayor eficiencia espectral en satélites de alta potencia.
- **Método de acceso al enlace.** Determina la manera en que las estaciones terrenas tendrán acceso al satélite, por lo que es el elemento que permite llevar al cabo un uso eficiente del ancho de banda. Se considera que el método más apropiado hasta el momento para redes de banda ancha por satélite es TDMA y variaciones de ésta como TDMA – DAMA y MF-TDMA (TDMA de multifrecuencia) [Akyildiz y Seong-Ho, 1997]

IV.2.2 MÉTODO DE TRANSPORTE DE CELDAS

Las celdas pueden ser transportadas utilizando formatos de transmisión digital existentes tales como: PDH (Jerarquía Digital Pleosíncrona), SDH (Jerarquía Digital Síncrona) y PLCP (Protocolo de Convergencia de la Capa Física). Existen incluso técnicas desarrolladas que permiten la transmisión de celdas ATM por el canal satelital, sin embargo esto requiere utilizar satélites que cuenten con capacidades de procesamiento y conmutación a bordo.

De entre los formatos digitales antes mencionados para el transporte de celdas, SDH es el que más se adecúa a las características del enlace satelital [Akyildiz y Seong-Ho, 1997], ya que resulta más eficiente que PDH en cuanto a sincronización y multicanalización, además de que es el menos susceptible a errores, característica primordial en este tipo de enlace.

Como se menciona en el capítulo III, SDH fué diseñado como tecnología de transporte en enlaces de fibra óptica, por lo que el estándar está definido para operar a tasas de bits altas, siendo el Modulo STM-1 a 155 Mbps el formato básico de transporte.

Para el caso de enlaces satelitales, se sabe que no se cuenta con el mismo ancho de banda en un transpondedor que en un enlace de fibra óptica sino que se tienen recursos limitados, por lo que alcanzar tasas de transmisión tan altas requiere la utilización de técnicas de modulación de mayor eficiencia espectral. De esta manera se provoca un incremento en las necesidades de potencia para realizar la transmisión, aumentando la complejidad del sistema [Becerra, 1997].

En base a estas necesidades, la ITU-T, en 1996 estandarizó el formato STM-0 para transmisión por radio en la recomendación G.861. Las características de operación de STM-0 son las mismas que para el caso de STM-1, solo que ahora la tasa de transmisión es de 51.84 Mbps, generalmente se hace referencia a esta tasa como 52 Mbps por simplicidad. Como STM-1 es considerada la estructura básica de SDH, el módulo STM-0 también se

conoce como sub-STM-1 y ambas estructuras son muy semejantes. En la figura 10 puede observarse la estructura de los marcos del módulo STM-0 [ITU-T, 1996].

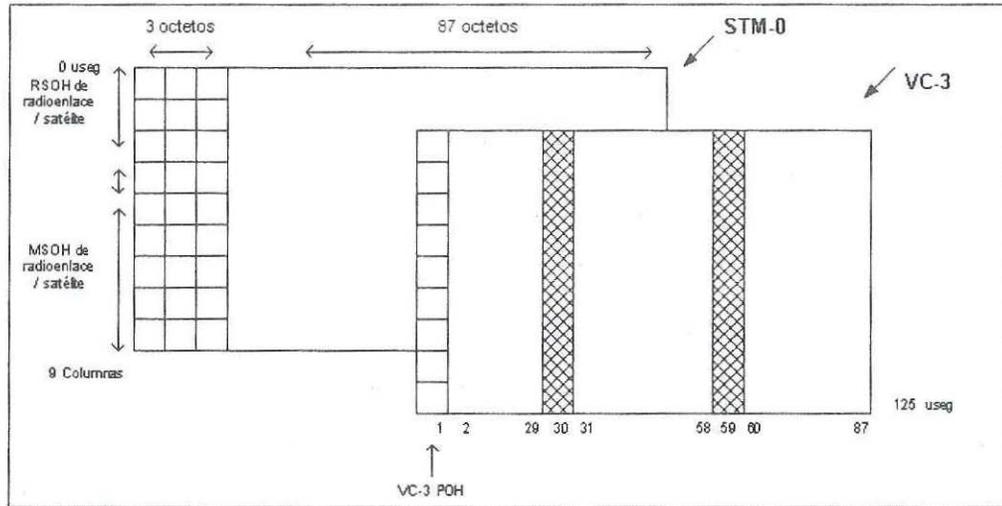


Figura 10. Estructura del módulo STM-0

Los marcos del STM-0 se componen de 90 x 9 bytes, de los cuales, 4 x 9 corresponden a encabezados (288 bits). En la especificación G.861 se encuentra la descripción de los encabezados de sección de radio y multicanalización (RSOH y MSOH). Dentro de la carga efectiva, las columnas 30 y 59 están marcadas para contener bytes de relleno, por lo tanto es posible transportar 14 celdas en cada marco, es decir 112,000 celdas por segundo. La emisión de los marcos cada 125 μs genera la tasa de transmisión de 51.84 Mbps.

La ITU-T sólo reconoce la estructura STM-0 para la utilización en sistemas de radio, la cual resulta aplicable para ciertos servicios de banda ancha, sin embargo, existen servicios

que requieren tasas de datos mucho menores. Se han realizado estudios [Strange et al, 1994] en los que se considera práctica la utilización de estructuras Sub-STM-1 mucho menores. En base a las jerarquías de SDH es válido reconocer como las tasas de datos más bajas las correspondientes a un contenedor virtual VC-11 o un VC-12 (1.544 y 2.048 Mbps), por lo que podrían formarse, mediante el principio básico de multicanalización que caracteriza a SDH, conjuntos de estructuras sub-STM-1 con tasas de bits de $N \times VC-12$ (o VC-11) e incluso utilizar tasas de bits $N \times VC-2$, VC-3, o VC-4 en caso de requerir mayor velocidad. Posiblemente no todas las tasas obtenidas serían requeridas por no ser compatibles con las tecnologías existentes, los estudios realizados [Strange et al, 1994] han llevado a formar una lista inicial de tasas que son:

$$\begin{array}{ll}
 i \times VC-12 & i = 1 \text{ a } 2 \\
 j \times VC-2 & j = 1 \text{ a } 2 \\
 k \times TUG-2 & k = 1 \text{ a } 7 \\
 l \times STM-0 & l = 1 \text{ ó } 2
 \end{array}$$

Estas tasas pueden soportar servicios tales como telefonía así como transmisión de televisión digital, por lo que es conveniente realizar estudios sobre su desempeño en enlaces satelitales de manera que en un futuro lleguen a ser estandarizadas.

IV.2.3 TÉCNICA DE RECUPERACIÓN DE ERRORES

Una de las diferencias más significativas entre ATM por fibra y su interconexión mediante enlaces satelitales es la presencia de errores en ráfagas. Las recomendaciones de la ITU-R para comunicaciones por satélite especifican un BER de 10^{-7} por un 95% del tiempo, mientras que las especificaciones para rendimiento en fibra óptica determina un BER de 10^{-9} por un 99.9% del tiempo.

Un canal satelital es especialmente susceptible a errores. Mientras que en un enlace de fibra estos se presentan raramente, los errores en los enlaces satelitales ocurren frecuentemente, debido a la atenuación inducida por lluvia y humedad, entre otros aspectos. Estos efectos son tolerables a frecuencias mucho menores de 10 GHz, pero resultan sustanciales a frecuencias mayores. Además, el efecto de la atenuación se incrementa con la frecuencia. De igual manera, conforme la tasa de bit de transmisión se incrementa, la duración efectiva de bit disminuye y si la potencia de transmisión se mantiene fija la energía por bit disminuye. Como consecuencia, la relación señal a ruido disminuye y por tanto se tiene una fuerte necesidad de control de errores en comunicaciones de banda ancha por satélite.

Además, en un enlace satelital los errores se presentan en forma de ráfagas, donde se producen errores en múltiples bits, debido a las atenuaciones que sufre el canal. Los errores en ATM sobre fibra óptica tienen características aleatorias, pero no se producen en ráfagas.

El campo de control de error en el encabezado de ATM (HEC, Header Error Control) es capaz de corregir errores de un sólo bit, por lo que los errores en ráfagas en el encabezado ATM no pueden ser corregidos. Por lo tanto, puede presentarse un incremento significativo en la probabilidad de pérdida de celdas en ATM que se define como la relación entre el número de celdas que son descartadas debido a errores incorregibles y el total de celdas recibidas.

Estos errores también tienen un efecto importante en los encabezados de los marcos SDH, ya que los errores en la sección de apuntadores de la estructura pueden ocasionar que se pierda la carga útil transportada, debido a que los apuntadores contienen la información necesaria para extraer las celdas apropiadamente.

Una manera de combatir estos errores es simplemente transmitir con más potencia. Aunque esta solución no es muy empleada por varias razones. Una es que el diseñar un satélite que transmita con más potencia implica un satélite mayor y más pesado, lo que no solo incrementa el costo del satélite, sino que existen límites en cuanto al tamaño y peso impuestos por los vehículos lanzadores.

Otras técnicas empleadas para el control de errores requieren enviar bits adicionales de información como son: FEC (Forward Error Correction) y ARQ (Automatic Repeat Request).

Las técnicas tipo FEC han sido utilizadas en comunicaciones espaciales desde hace tiempo con resultados aceptables y actualmente son muy comunes en estas aplicaciones. Esta técnica tiene la capacidad de detectar y corregir errores utilizando códigos de detección de errores, entre los que se encuentran códigos convolucionales, BCH y cíclicos, entre otros. Todos ellos implican la adición de bits redundantes en la información transmitida.

En teoría es posible generar códigos que puedan detectar o corregir cada uno de los errores que se presenten. La eficiencia de un esquema de codificación de errores es una medida del número de bits redundantes que deben agregarse a la información, lo que tiene consecuencias tanto en la tasa de transmisión como en el caudal eficaz y los requerimientos de ancho de banda del canal. En algunos sistemas FEC el número de bits redundantes es igual al número de bits de datos, lo que repercute en la división a la mitad de la tasa de datos para una tasa de transmisión dada y se le conoce como un esquema FEC de $\frac{1}{2}$. La pérdida de capacidad en el canal se compensa con la garantía de tasas bajas de errores, y puede ser recuperada utilizando técnicas de modulación de mayor eficiencia espectral.

FEC es comúnmente preferido para proteger información con condiciones estrictas en cuanto a retardos como es el audio y video en tiempo real, así como las llamadas de voz CBR consideradas en este trabajo de tesis.

En ARQ se requieren retransmisiones para corregir errores en la información recibida. ARQ trabaja bien para proteger información que debe ser entregada con alta fidelidad pero puede llegar a tener retardos variables para lograr esta fidelidad, por lo que no es apropiado para aplicaciones sensibles al retardo.

IV. 3. RETARDO EN LA TRANSMISIÓN POR SATÉLITE

Uno de las principales efectos adversos en la interconexión de redes ATM mediante enlaces satelitales es el aumento en el retardo de transferencia de información, el cual es el

resultado de varias fuentes. En enlaces de banda ancha por satélite el mayor impacto lo tienen los retardos de almacenamiento en buffer así como el retardo de propagación, sobre todo para el caso de satélites geoestacionarios.

El retardo de transferencia punto a punto está dado en segundos por la ecuación 4 [Goyal et al, 2000] :

$$\mathbf{R} = r_i + r_{asc} + r_i + r_{dsc} + r_s + r_q \quad (4)$$

Los términos en la ecuación (4) corresponden a los siguientes retardos:

Retardo de transmisión (r_t).

Es el tiempo que se requiere para transmitir una celda o paquete de datos a la tasa de datos de la red, y es el resultado de la diferencia en tiempo desde el momento en que se inicia la transmisión del primer bit y el final de la transmisión del último bit del paquete. Generalmente este retardo es despreciable en redes de banda ancha, ya que las tasas de transmisión son muy altas.

Retardo de propagación.

El retardo de propagación de las celdas es la suma de los retardos de propagación de la estación terrena hacia el satélite (r_{asc} , enlace ascendente), los retardos de propagación

intersatelitales (r_i), en caso de existir estos enlaces en el sistema y el retardo de propagación desde el satélite hacia la estación terrena destino (r_{dsc} , enlace descendente).

Los retardos de propagación ascendente y descendente representan el tiempo que se requiere para que la señal viaje desde la estación fuente y el tiempo en que la señal llega hacia la estación destino desde el satélite. Estos retardos dependen de la distancia entre las terminales y el satélite, por lo que esta relacionado con la órbita del satélite siendo mayor para órbitas tipo GEO y menor para LEO.

Retardo de almacenamiento (Buffering).

Este retardo (r_q) es la suma de los retardos que ocurren en cada punto de la red debido al almacenamiento de celdas en buffers de memoria, lo que puede suceder en los conmutadores ATM, o en el equipo de la estación terrena empleado como parte del protocolo de acceso al medio o técnica de acceso de las celdas hacia el satélite. Los retardos de almacenamiento dependen de los niveles de congestión, de las políticas de calendarización y almacenamiento, así como de la prioridad de las celdas debido a la categoría de servicio a la que corresponda, en caso de tener múltiples servicios en la conexión.

El retardo máximo de almacenamiento puede calcularse en base al tamaño del buffer utilizando la ecuación 5 [Goyal et al, 2000]:

$$\text{Retardo_Buffer} \leq \frac{\text{tamaño_buffer}}{\text{tasa_drenado_buffer}} \quad (5)$$

La tasa de drenado del buffer es la tasa a la que las celdas son atendidas por el buffer, la cual depende de varios aspectos como son la capacidad del enlace, el tiempo de procesamiento en el buffer así como las prioridades y políticas de calendarización cuando se da servicio a diferentes tipos de tráfico, como ya se ha mencionado.

Considerando únicamente la tasa de datos y el tiempo de procesamiento del buffer, la tasa de drenado del buffer puede calcularse obteniendo el tiempo en que se atiende cada celda, considerándolo como el período de celda, al cual se agrega el tiempo de procesamiento. De esta manera se obtiene el tiempo que la celda permanecerá en el buffer, siendo la tasa de drenado del buffer el inverso de este valor, calculada mediante la ecuación 6:

$$\text{tasa_drenado_buffer} = \frac{1}{\text{período_celda} + \text{tiempo_procesamiento_celda}} \quad (6)$$

Retardos de conmutación y procesamiento.

Estos retardos (r_s) se presentan en los conmutadores ATM o en los puntos en que las celdas sean procesadas para su conmutación, lo que puede ocurrir en el satélite si se cuenta

con procesamiento a bordo. Para los conmutadores ATM comerciales estos retardos son muy pequeños (aprox. 1 μ s), por lo que resultan casi despreciables en comparación a los retardos anteriores.

La suma de los retardos antes mencionados también se conoce como *latencia* cuando se refiere al retardo de punto a punto, es decir la cantidad de tiempo que se requiere para que una celda, en caso de ATM, llegue de un extremo a otro de la red. Cuando se utilizan técnicas de acceso al medio tales como TDMA, éstas provocan un retardo extra en espera de su turno para ocupar su ranura de tiempo asignada, que también se debe considerar en el cálculo de la latencia.

En muchos casos es importante saber el tiempo que se requiere para que esta información realice un “viaje redondo”, como el caso en que el transmisor requiera de un reconocimiento de recepción de información. En tales casos el transmisor debe esperar el tiempo que transcurre antes de que el receptor reciba la información y además el tiempo necesario para recibir el reconocimiento, lo cual se conoce como “tiempo de viaje redondo”, también conocido en terminología de comunicaciones como RTT (Round-trip time).

El ancho de banda de un canal, es decir el número de bits que pueden ser transmitidos por éste durante cierto período de tiempo, junto con la latencia son combinados para definir características importantes sobre el desempeño de una red. A esto se le conoce como el producto “Retardo-Ancho de banda”, el cual permite conocer cuantos bits o celdas se

encontrarán en el canal después de realizada una transmisión y antes de que éstos sean recibidos, de esta manera el transmisor sabe que cantidad de información debe transmitir antes de esperar cualquier reconocimiento en caso que así lo requiera.

Una manera intuitiva de pensar en el producto *retardo-ancho de banda* es pensar en el canal como un tubo donde la latencia representa la longitud del mismo y el ancho de banda es su diámetro, de manera que este producto corresponde al volumen o capacidad del canal.

La latencia en conexiones satelitales es generalmente de 5 a 10 ms cuando se utilizan satélites en órbitas LEO y de 240 a 280 ms para el caso de satélites en órbita GEO. Esto provoca RTT (Retardos de viaje redondo) de hasta 560 ms para este último tipo de satélites.

IV.4 IMPACTO DEL ENLACE SATELITAL EN LA CALIDAD DE SERVICIO

La eficiencia de la integración entre redes ATM y sistemas satelitales se evalúa en base a la Calidad de Servicio. Como se menciona en el capítulo III, esta es una característica básica en ATM, por lo que una de las metas más importantes en esta integración es lograr que los servicios no sean afectados o degradados por los retardos y errores que se presentan en un enlace satelital.

La variación en el retardo, o más específicamente en la transferencia de celdas (CDV), también es un parámetro de calidad de servicio que puede aumentar al utilizar un enlace satelital, y al igual que el retardo depende de varios factores. Estos suelen ser: cantidad de tráfico o carga que pueda soportar el sistema, la capacidad de almacenamiento en los conmutadores, la técnica de acceso múltiple utilizada, y en sí todos los elementos incluidos en la red que reflejan un retardo de almacenamiento. En el caso de utilizar SDH, la inserción de campos en el encabezado provoca retardos en los bits provenientes de la capa ATM.

Los satélites LEO provocan especialmente altas variaciones en el retardo, debido principalmente a los procedimientos de traspaso entre satélites. Estos retardos pueden llegar a ser incluso del orden de los retardos de propagación.

La relación de celdas perdidas (CLR) puede incrementarse también, como ya se ha mencionado, por los errores en ráfagas que se presentan en los enlaces satelitales, lo que afecta de igual manera otros parámetros como la relación de celdas con error (CER) y la tasa de bloques severamente dañados (SECBR).

Varias organizaciones están trabajando actualmente en el desarrollo de estándares específicos para ATM sobre satélite, principalmente El Foro ATM y la ITU (International Telecommunication Union), las cuales a su vez se basan en documentos que han sido

desarrollados para ATM terrestre, tales como la Especificación de Administración de Tráfico (TM 4.0 y 4.1) del Foro ATM y las Recomendaciones I.356 y la I.357 de la ITU.

En su Recomendación I.356, la ITU define 4 clases de tráfico que requieren ser tratados de manera diferente por las redes ATM. También define los valores de sus parámetros de desempeño correspondientes, tal como se muestra en la tabla V.

Tabla V. Clases de tráfico y sus parámetros de desempeño correspondientes [ITU-I.356].

Clase	Descripción	CTD	CDV	CLR	CER	CMR	SECBR
Clase 1 (clase estricta)	Tipo de tráfico sensible al retraso, definida para dar soporte a servicios CBR y VBR, como telefonía y videoconferencias	400 ms	3 ms	3×10^{-7}	4×10^{-6}	1/día	10^{-4}
Clase 2 (Clase tolerante)	Tráfico tolerante al retraso soporta servicios ABR y nrt-VBR, como video y datos.	Indef.	Indef.	10^{-5}	4×10^{-6}	1/día	10^{-4}
Clase 3 (Clase binivel)	Soporta servicios VBR y ABR como datos a alta velocidad.	Indef.	Indef.	Indef.	4×10^{-6}	1/día	10^{-4}
Clase 4 (Clase indef.)	Soporta servicios UBR tales como transferencias de archivos y correo electrónico.	Indef.	Indef.	Indef.	Indef.	Indef.	Indef.

Para el caso de enlaces por satélite estos valores pueden resultar muy estrictos, ya que es necesario considerar las características propias del enlace que influyen en los parámetros de desempeño.

Las aplicaciones interactivas de voz requieren un retardo muy bajo (ITU-T especifica un retardo menor de 400 ms para prevenir los efectos de eco) así como también variaciones en el retardo muy bajas (máximo 3 ms). Los sistemas GEO tiene un alto retardo de

propagación de al menos 240 ms de estación terrena a estación terrena. Se tienen además otros componentes que inducen retardo, de manera que este puede llegar a ser mayor que 400 ms. Las aplicaciones de voz no interactivas son aplicaciones en tiempo real cuyos requerimientos de retardos no son tan estrictos, sin embargo éstas aplicaciones son exigentes en cuanto a requerimientos de jitter o CDV. El desempeño de aplicaciones tales como transferencia de archivos dependientes del caudal eficaz casi no presentan requerimientos en cuanto a retardo, de manera que sistemas LEO y GEO con suficiente caudal eficaz son capaces de cumplir con los requerimientos de retardo en aplicaciones de transferencia de archivo.

En este trabajo se analiza el tráfico CBR correspondiente a la clase 1 o clase estricta de la ITU.

IV.5 CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO TELEFÓNICO

La telefonía básicamente permite la comunicación verbal a distancia mediante la transmisión de voz entre dos sitios lejanos. Esta transmisión se realizaba inicialmente de manera analógica, aunque en la actualidad es primordialmente digital, lo que requiere elementos que permitan la digitalización de la voz. Estos elementos se conocen como codificadores de voz o “vocoders” (voice coder), y el proceso que permite la codificación de la voz se conoce como Modulación de pulsos codificados (PCM, Pulse Code Modulation), aunque en realidad no se realiza ningún tipo de modulación.

Los servicios de telefonía en ATM pueden ser transportados de dos maneras. La primera es por medio de la categoría CBR como tráfico con una tasa de bit continua. La otra manera es con una tasa variable de bit (VBR), que tiene como diferencia con la primera que aquí es posible suprimir el envío de información durante los períodos de silencio.

La transmisión de voz a tasa de bits continua se basa en PCM y requiere 64 kbps de ancho de banda. Existen otras técnicas como por ejemplo la Modulación por Código de Pulsos Diferencial Adaptativa (ADPCM, Adaptive Diferencial PCM) y otros esquemas que pueden reducir el ancho de banda a 32 ó 16 kbps sin deteriorar la calidad de la voz [DuBose, 1991].

La capa AAL1 de ATM provee el servicio de transporte de voz CBR. En este trabajo se considera la utilización de este servicio a 64 kbps y, como puede observarse en la tabla V de este capítulo, la categoría CBR es la más estricta en cuanto a requerimientos de parámetros de calidad de servicio, especialmente en cuanto a retardos y variación en el retardo aceptadas. En base a lo anterior, no se extiende más el tema sobre las características del tráfico VBR o sobre la utilización de vocoders que permitan utilizar un menor ancho de banda.

En telefonía, uno de los parámetros más importantes es la intensidad de tráfico, la cual determina la cantidad de tráfico que será transmitido por el canal en base a unidades de tiempo. En términos de telefonía la intensidad de tráfico se define como: “ Una medida del

tiempo de utilización del canal, el cual es un promedio de la utilización del canal medida en Erlangs. Es una cantidad adimensional y puede ser utilizada para medir el tiempo de utilización de un canal o de múltiples canales”[Rappaport, 1996].

Una manera común de medir el tráfico esperado en una red telefónica consiste en asignar un cierto número de llamadas por unidad de tiempo con una cierta longitud de llamada. La intensidad de tráfico (T) expresada en Erlangs está dada por la ecuación 7:

$$T = \frac{1}{60} \int_0^y x(y) dy = \frac{(x)(y)}{60} \quad (7)$$

Donde x es el número de llamadas por hora y y es la duración media de las llamadas en minutos. Un Erlang representa la cantidad de intensidad de tráfico transportada por un canal que está completamente ocupado (ejemplo: 1 llamada de una hora por hora o 1 llamada de un minuto por un minuto). Por ejemplo, un canal que se encuentra ocupado durante 30 minutos por una hora transporta 0.5 Erlangs de tráfico.

La duración de las llamadas usualmente sigue un comportamiento exponencial, es menos probable tener llamadas de larga duración. Las peticiones de tráfico son descritas por una distribución de Poisson, lo que implica tiempos de interarribo de llamadas distribuidos exponencialmente.

Estas características describen el comportamiento del tráfico de llamadas de voz, el cual ha sido modelado en este trabajo, como se explica en el capítulo V, con la finalidad de analizar los efectos del canal satelital en el servicio CBR de ATM.

V. MODELO DE SIMULACIÓN

V.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se mencionan los elementos que deben considerarse para implementar la interconexión de redes ATM mediante enlaces satelitales. Con la finalidad de evaluar el desempeño de un enlace de este tipo en este trabajo de investigación se diseñó un modelo de simulación que, de manera general, consiste en el establecimiento de servicio telefónico a través de redes ATM interconectadas mediante un enlace satelital.

El modelo en sí permite analizar la transmisión en un sólo sentido, ya que la finalidad del mismo es evaluar los parámetros de calidad definidos para la transmisión punto a punto. Sin embargo, aunque se tiene la capacidad de simular un enlace bidireccional, esto no se llevo a cabo en el presente trabajo, debido a que la información de interés se obtiene con la primera opción.

La herramienta utilizada para la implementación del modelo fue el simulador de redes OPNET (Optimized Network Engineering Tools) Modeler, en su versión 7.0 B el cual basa la construcción de los modelos en tres dominios básicos¹.

- RED. En el cual se determina la dimensión geográfica de la red, especificando los atributos del equipo a utilizar así como los enlaces correspondientes.

¹ www.opnet.com

- NODO. En este dominio se especifica el modelo de cada tipo de nodo mediante un diagrama a bloques. Existen nodos de proceso que tienen un modelo de proceso asociado.
- PROCESO. Aquí se lleva al cabo la definición del comportamiento particular de un proceso utilizando diagramas de transición de estados así como líneas de instrucción.

En las siguientes secciones se muestra la descripción de los elementos en cada uno de los dominios del modelo implementado.

V.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RED

El modelo implementado consiste del modelo de red mostrado en la figura 11, en el cual puede apreciarse que básicamente se compone de redes ATM (RED_1 – RED_D) y un nodo que representa un satélite geostacionario el cual interconecta estas redes. Las redes ATM, dentro de este modelo se componen de elementos conocidos como subredes en OPNET, ya que interiormente contienen nodos formando una red ATM.

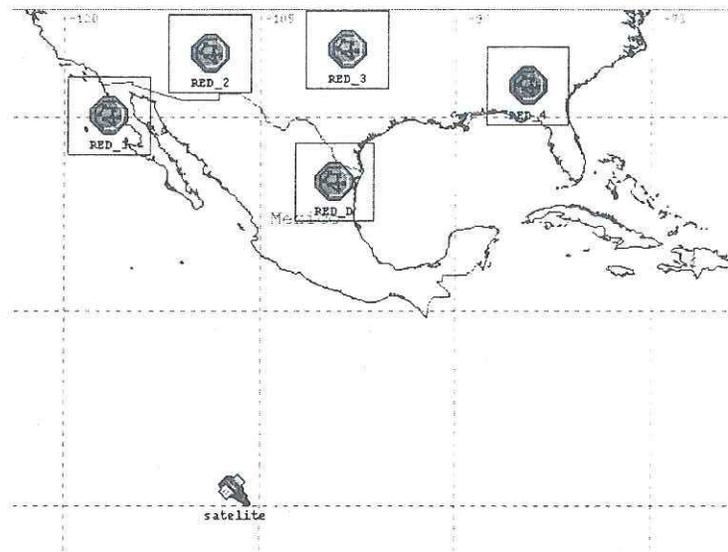


Figura 11. Dominio de red del modelo.

Las subredes denominadas RED_1 hasta RED_4 son las redes transmisoras, ya que, como se ha mencionado, en el modelo se analiza la transmisión en un sólo sentido, la RED_D es la red destino a donde el satélite dirige las transmisiones para enviar los paquetes que recibe por parte de las otras subredes.

En la figura 12 se muestran los nodos que componen internamente a cada una de las subredes (RED_1 – RED_4).

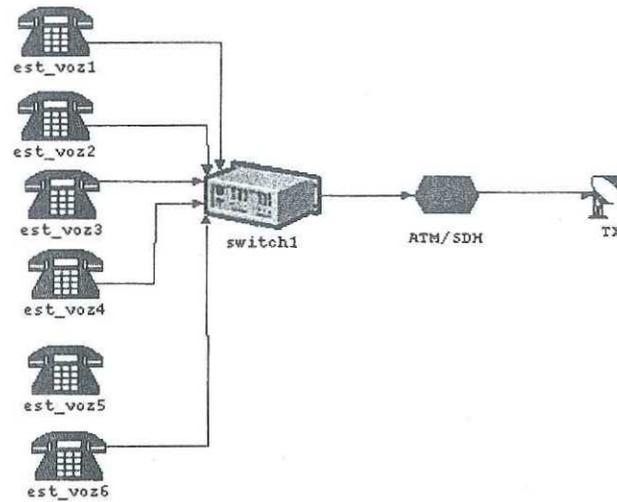


Figura 12. Dominio de red de las subredes del modelo

Cada uno de los nodos se describe con más detalle en la siguiente sección. De manera general el funcionamiento de esta red consiste en que las estaciones de voz (est_voz) se encargan de generar celdas ATM, las cuales son procesadas por el conmutador ATM (switch1) y enviadas al puerto correspondiente. La red utiliza como transporte de celdas el formato SDH, por lo que el nodo ATM/SDH se encarga de formar los marcos SDH, que son transmitidos hacia el satélite utilizando el nodo TX, el cual emplea la técnica de acceso TDMA para llevar al cabo su tarea.

La única diferencia de estas subredes con la red destino (RED_D) es el nodo transmisor (TX), ya que en este caso únicamente se requiere de un nodo que reciba los marcos SDH que le envíe el satélite, todos los otros nodos tienen la capacidad de ser configurados de manera que funcionen tanto para la transmisión como para el proceso de recepción.

V.3 DESCRIPCIÓN DE NODOS Y PROCESOS

Cada uno de los nodos antes mencionados está compuesto internamente por elementos que determinan su funcionamiento, a esta parte se le conoce en OPNET como el *dominio de nodo*, existiendo elementos ya definidos en OPNET para realizar funciones específicas, pero además se tiene la facilidad de poder crear nodos propios, cuyas funciones se definen mediante programación utilizando diagramas de estados, lo que en OPNET se define como *dominio de proceso*.

V.3.1 SATÉLITE

En el modelo diseñado el satélite funciona como un repetidor (bent-pipe), cuya tarea es recibir la información de las subredes transmisoras y enviarla hacia la red destino. El modelo de nodo del satélite se muestra en la figura 13.

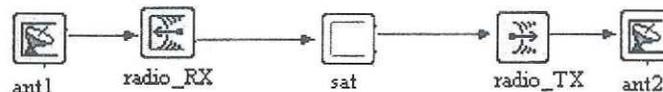


Figura 13. Modelo de nodo del satélite.

Las antenas (“ant1” y “ant2”) así como los receptores y transmisores de radio (“radio_RX” y “radio_TX”) son elementos ya incluidos en OPNET que permiten establecer enlaces inalámbricos modificando sus parámetros para adaptar su funcionamiento a las necesidades específicas del modelo. En el caso del elemento “sat”, éste consiste en un proceso cuyo funcionamiento es muy sencillo, ya que sólo debe tomar los paquetes que recibe y transmitirlos mediante el radio transmisor.

La tabla VI muestra las principales características del nodo satélite.

Tabla VI. Parámetros de operación del nodo satélite

Parámetro	Valor
Tipo de órbita	Geoestacionaria
Longitud	100.9 °
Altitud sobre el Ecuador	36 000 km
Ancho de banda	54 MHz
Frecuencia (Ka)	30 / 20 GHz (ascendente/descendente)
Tasa de transmisión	52 Mbps
Técnica de modulación	QPSK

Es importante aclarar que el trabajo realizado no incluye un análisis detallado del canal satelital ni de los parámetros correspondientes a la capa física, por lo que no se llevó a cabo un presupuesto de potencia. Ciertos parámetros se eligieron en base a satélites existentes, como la ubicación de éste que corresponde a la del satélite SOLIDARIDAD I, pudiendo establecer de esta manera la posible ubicación de algunas de las redes en base a trabajos de investigación realizados anteriormente [Becerra, 1996]. Así mismo se tomaron las características de un satélite operando en banda Ka como es el caso del satélite ACTS

NASA, utilizado actualmente para fines de investigación, adaptando los parámetros al servicio que se considera en este trabajo.

Se considera una tasa de transmisión de 52 Mbps, que corresponde a un STM-0, la cual es la estructura SDH utilizada.

Se emplea la técnica de modulación QPSK, la cual como se ha mencionado tiene una eficiencia espectral de 2 b/s/hz, esto con el fin de considerar la utilización de una técnica FEC de $\frac{1}{2}$ para la corrección de errores. El uso de FEC consiste en agregar bits adicionales a la información, lo que incrementa los requerimientos de ancho de banda, y por tanto la necesidad de una técnica de modulación eficiente en espectro como QPSK para poder utilizar los 54 MHz de ancho de banda del transpondedor del satélite. Los parámetros, por tanto permiten considerar esta técnica de corrección de errores, sin embargo ésta no se implementa en el modelo reportado en este trabajo.

V.3.2 ESTACIONES DE VOZ

Las estaciones de voz (“est_voz”) corresponden a las fuentes generadoras de llamadas telefónicas, en el caso de encontrarse en alguna de las redes transmisoras. También pueden actuar únicamente como receptoras si están ubicadas en la red destino, ya que su funcionamiento depende de la manera en que se conecten. La figura 14 muestra el modelo de nodo de las estaciones.

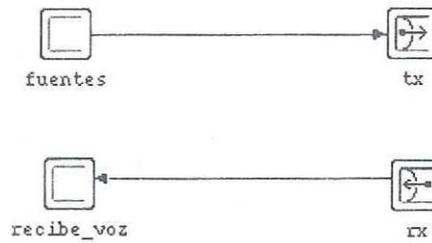


Figura 14. Modelo de nodo de las estaciones de voz

Nuevamente el receptor y el transmisor (“rx” y “tx”) son elementos incluidos en OPNET, los cuales sólo requieren ser adaptados al modelo diseñado modificando algunos de sus parámetros.

El elemento “recibe_voz” consiste en un proceso que se encarga de tomar las celdas dirigidas hacia la estación de voz cuando ésta se encuentra en la red destino. En este proceso además se generan y almacenan todas las estadísticas que se requieren en el modelo, tales como retardo, variación en el retardo, paquetes recibidos y paquetes perdidos.

El receptor (“rx”) del modelo se conecta a algún puerto de salida del conmutador ATM cuando se utiliza este nodo como receptor de llamadas en la red destino.

Si el nodo se encuentra en las redes transmisoras entonces el transmisor (“tx”) del nodo se conecta a algún puerto de entrada del conmutador, en este caso el elemento “fuentes” se encarga de generar las llamadas telefónicas mediante el proceso “Genera” mostrado en la figura 15.

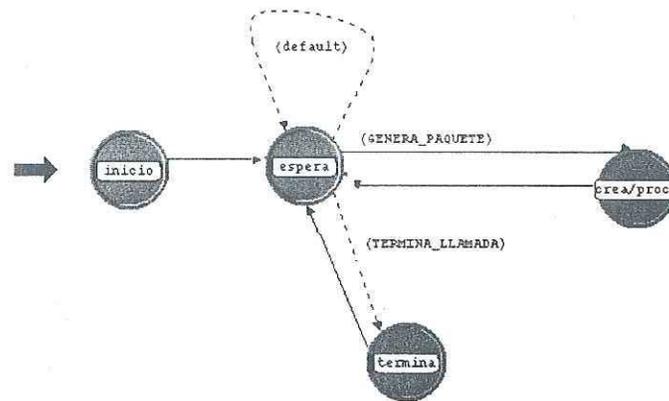


Figura 15. Modelo de proceso de las fuentes de voz (“Genera”)

Este proceso es básico en el modelo, ya que está diseñado para simular las características del tráfico telefónico del cual dependen los parámetros de calidad de servicio que deben considerarse. En este caso, como ya se ha mencionado, se considera que las fuentes transmiten a una tasa constante (CBR) de 64 kbps, que corresponde a la clase 1 de la ITU-T (tabla V, capítulo IV).

Cada una de las estaciones está diseñada para simular varias fuentes generadoras de llamadas y operar con diferentes intensidades de tráfico, lo que puede variarse en el modelo

ya que estos parámetros se incluyeron como atributos del nodo. En la figura 16 puede observarse la ventana que permite modificar los atributos que se agregaron al nodo.

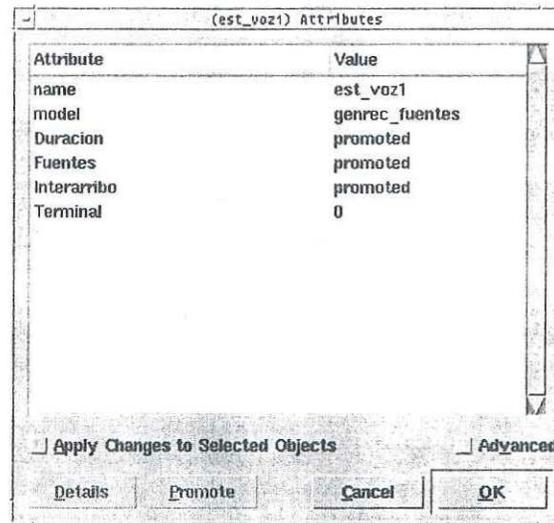


Figura 16. Atributos del nodo de estaciones de voz

El parámetro “Fuentes” es un número entero que determina el número de fuentes que la estación de voz simulará, la intensidad de tráfico se determina en base a los parámetros “Duracion” que se refiere al tiempo que dura cada llamada e “Interarribo”, que indica el tiempo promedio en que se generará cada llamada. El parámetro “Terminal” sólo se utiliza para indicar el número de estación de voz.

En el estado “inicio” del proceso de generación de llamadas se leen estos atributos del nodo.

Como se menciona en el capítulo IV, la duración de una llamada de voz usualmente sigue un comportamiento exponencial y las peticiones de tráfico se describen mediante una distribución de Poisson, lo que implica tiempos de interarribo de llamadas distribuidos exponencialmente. Debido a lo anterior en el proceso los atributos “Duración” e “Interarribo” son utilizados como parámetros de funciones incluidas en OPNET para obtener N valores con estos tipos de distribuciones.

Dentro del proceso, se utiliza una matriz de datos que contiene las N duraciones e interarribos de las N fuentes que la estación esté simulando. Las llamadas que se generan simultáneamente son aquellas cuyos tiempos de interarribo coinciden, obviamente entre mayor sea la intensidad de tráfico serán más las llamadas generadas al mismo tiempo. Con una intensidad de 1 Erlang, todas las fuentes generarían llamadas simultáneamente todo el tiempo.

En el estado “espera” del proceso se determina si en ese momento se están generando llamadas, o si alguna de las llamadas ya terminó en base a su duración.

Si hay llamadas en proceso en el estado “crea/procesa” se generan las celdas correspondientes a estas llamadas.

Debido que se considera la transmisión de voz a una tasa constante de 64 kbps (o 170 celdas/s), se crean $M * 170$ celdas/s de 47 bytes, siendo M el número de llamadas en proceso y 47 bytes la carga efectiva de una celda para la capa AAL1.

A las celdas se les agrega el byte correspondiente al número de secuencia (SN) y la protección del número de secuencia (SNP). En este estado se agrega también el encabezado ATM, el valor del campo VCI se calcula aleatoriamente mediante una distribución uniforme, para dirigir las llamadas a diferentes destinos. Obviamente todas las celdas correspondientes a una misma llamada tienen el mismo valor de VCI.

Cuando en el estado “espera” se encuentra que ha finalizado una llamada se pasa al estado “termina” en donde se obtiene un nuevo valor de duración e interarribo para una nueva llamada, con el fin de llenar el espacio correspondiente en la matriz de fuentes generadoras.

Los estados “termina” y “crea/procesa” regresan al estado “espera” una vez que han terminado sus funciones, el proceso se mantiene en este estado hasta que ocurra alguno de los dos eventos descritos anteriormente.

V.3.3 CONMUTADOR ATM

En el modelo, el conmutador ATM (“switch1”) se encarga de recibir las celdas provenientes de las estaciones de voz y enviarlas a través del puerto de salida correspondiente, cuando se encuentra en las subredes transmisoras. En el caso de la subred destino el conmutador toma las celdas del nodo ATM/SDH y las envía a través de los puertos de salida hacia la estación a la que haya sido dirigida.

Cuenta con un buffer interno para el almacenamiento de las celdas que llegan y deben esperar antes de ser procesadas. En la figura 17 se muestra el modelo de nodo del conmutador.

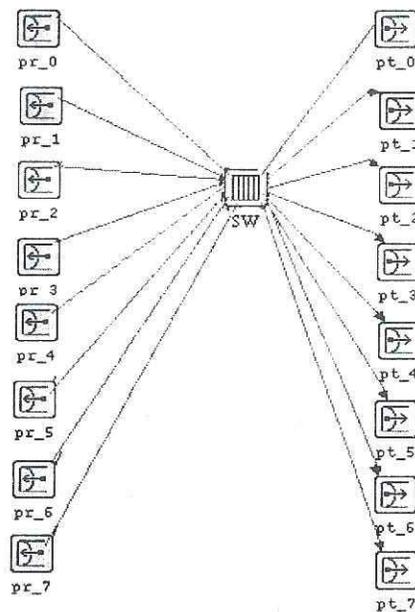


Figura 17. Modelo de nodo del conmutador ATM

Cada uno de los puertos de entrada y de salida (“pr” y “pt”) son receptores y transmisores básicos de OPNET, respectivamente.

El elemento “SW” contiene el proceso “Conmuta” el cual fue programado para realizar las operaciones básicas del conmutador. Este proceso se muestra en la figura 18.

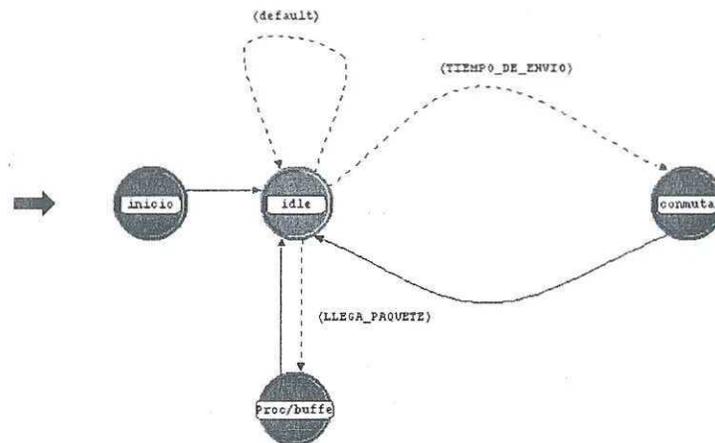


Figura 18. Modelo de proceso del conmutador ATM (“Conmuta”)

El proceso “Conmuta” utiliza una cola de almacenamiento para las celdas que recibe en los puertos de entrada. En el estado “inicio” se determina la capacidad de esta cola o “buffer” así como la velocidad a la que se procesarán las celdas que reciba y el tiempo de procesamiento requerido.

En el siguiente capítulo se explica más detalladamente las simulaciones que se realizaron, para lo cual fue necesario modificar los atributos antes mencionados del conmutador. El tiempo de procesamiento se mantuvo fijo en 1 μ seg, de acuerdo a las características de los conmutadores comerciales existentes. La velocidad de operación del conmutador se modificó de acuerdo a las tasas de transmisión simuladas (52 y 13 Mbps) las cuales determinan el “Tiempo_de_envío” para las celdas. El conmutador utilizado en la subred destino siempre opera a 52 Mbps.

El estado “idle” u ocioso, es el estado en el que el proceso permanece hasta que se reciba un paquete (celda ATM) o se cumpla con el tiempo en que se atiende cada celda.

Al recibir una celda el proceso pasa al estado “proc/buffer” en donde la celda es almacenada en el buffer o desechada en caso de que el buffer alcance su capacidad máxima.

El proceso pasa al estado “conmuta” cuando se cumple con el tiempo de envío de la celda (en base a la velocidad de operación del conmutador) más el tiempo que se requiere para su procesamiento (1 μ seg). En este estado las celdas se toman del buffer utilizando el esquema FIFO (primera entrada, primera salida) y se envían al puerto de salida correspondiente, que depende del valor en el campo VCI de la celda.

V.3.4 EQUIPO ATM/SDH

El nodo ATM/SDH, mostrado en la figura 19, puede configurarse para utilizarse en las redes transmisoras o en la red destino .

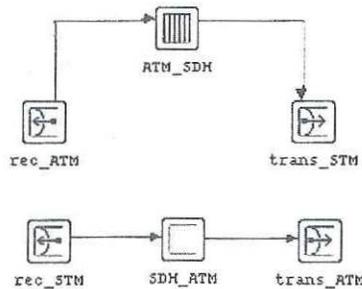


Figura 19. Dominio de nodo del equipo ATM/SDH

Como puede observarse en la figura 19, el nodo se compone de dos partes.

La parte superior se encarga de realizar la inserción de las celdas ATM dentro de la carga útil de los marcos SDH. Se compone de un receptor (“rec_ATM”) que recibe las celdas ATM provenientes del conmutador, un transmisor (“trans_STM”) que se utiliza para enviar los marcos SDH hacia el nodo “TX” y del proceso “ATM/SDH”.

La segunda parte del nodo lleva al cabo el proceso inverso, es decir extrae las celdas ATM de los marcos SDH y por tanto contiene los elementos correspondientes para llevar al cabo esta tarea.

En la figura 20 se muestra el proceso utilizado para realizar la primera operación.

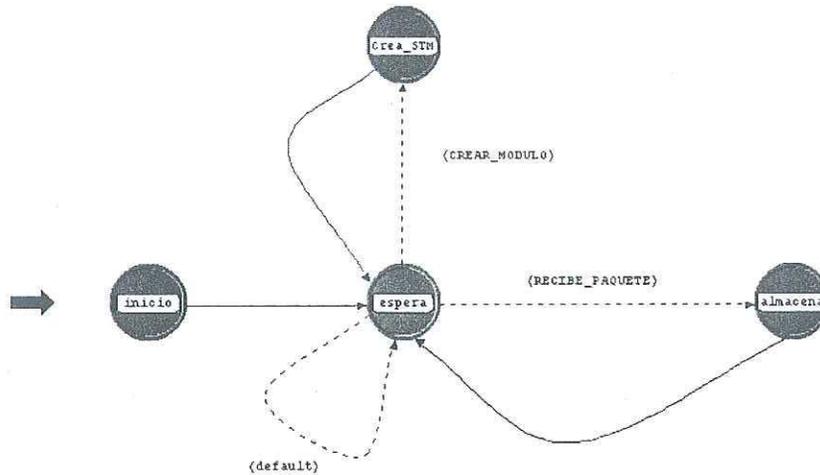


Figura 20. Modelo de proceso ATM/SDH

Este proceso utiliza una cola para almacenar las celdas ATM que recibe. En el estado “inicio” únicamente se inicializan las variables que se utilizarán durante el proceso, pasando inmediatamente al estado “espera” en el cual permanece hasta que ocurra alguno de los dos eventos que lo hacen cambiar de estado. El primero de ellos es la llegada de una celda ATM, este evento provoca que el proceso pase al estado “almacena”, ya que las celdas ATM que se recibe son colocadas en la cola y son extraídas de ésta hasta que se pasa al estado “crea_STM”. Como se ha mencionado los marcos SDH son formados cada 125 μ s, por lo que el estado “crea_STM” se activa cada vez que se cumple este tiempo, tomando la cantidad de celdas ATM almacenadas en la cola que correspondan a la carga efectiva del módulo que se este formando. Cada marco creado se envía al nodo “TX” para que sea transmitido hacia el satélite.

En base a las simulaciones que se llevaron al cabo, el proceso ATM/SDH puede formar módulos STM-0 a 52 Mbps, los cuales contienen 14 celdas ATM en cada marco, o módulos sub-STM-1 a 13 Mbps, conteniendo 3 celdas ATM, según se explica en el siguiente capítulo.

El proceso inverso, es decir la extracción de las celdas ATM de los marcos SDH, es muy sencillo, ya que el proceso sólo se encarga de recibir los marcos SDH y tomar la cantidad de celdas correspondientes a la carga efectiva, las cuales envía hacia el conmutador ATM para su procesamiento. El proceso SDH/ATM se muestra en la figura 21.

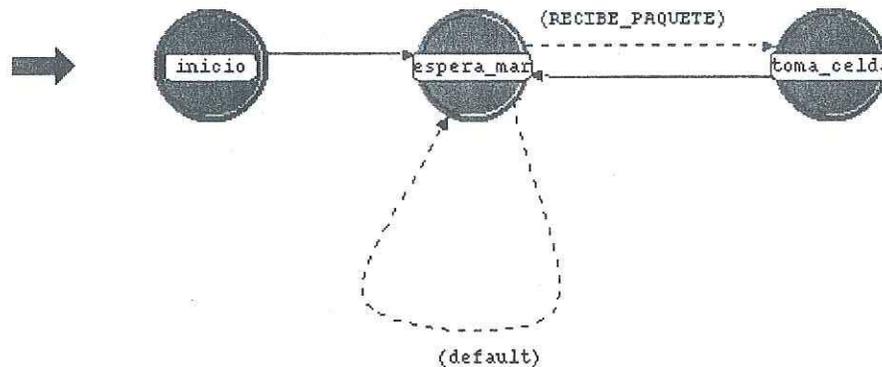


Figura 21. Modelo de proceso SDH/ATM

V.3.5 NODO TRANSMISOR

El nodo transmisor (“TX”), mostrado en la figura 22, se encarga de realizar las transmisiones de los marcos SDH, provenientes del equipo ATM/SDH, hacia el satélite.

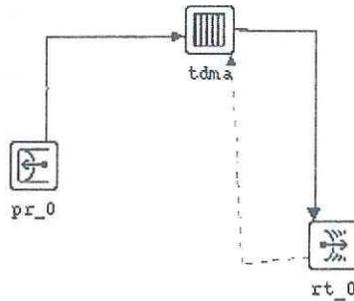


Figura 22. Modelo de nodo del transmisor

Como puede observarse en la figura 22, el nodo está formado por un receptor (“pr_0”) el cual permite el enlace con el nodo ATM/SDH, un radio transmisor (“rt_0”) hacia el satélite y del proceso “tdma” que lleva al cabo la operación de la técnica de acceso TDMA hacia el satélite.

El proceso “tdma” fue tomado de los modelos contribuidos a la biblioteca de OPNET, los cuales pueden obtenerse en la dirección de Internet de esta compañía². Este proceso se adaptó a las necesidades del modelo realizado para este trabajo, para lo que fue necesario modificar algunos estados y agregar nuevas líneas de instrucción. La figura 23 muestra el modelo de este proceso.

² www.opnet.com

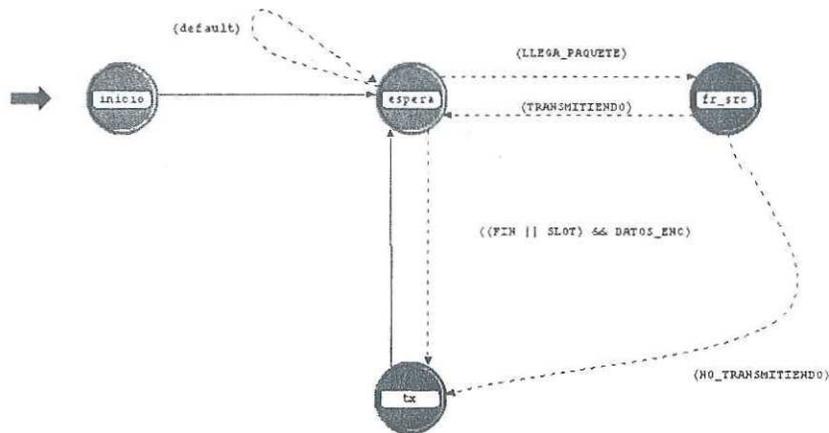


Figura 23. Modelo de proceso de TDMA.

El funcionamiento general del proceso consiste en asignar ranuras de transmisión a cada uno de los nodos transmisores que se encuentren en el modelo. Los nodos, por lo tanto solo pueden transmitir durante su ranura correspondiente. El proceso utiliza una cola o buffer para almacenar los marcos SDH que llegan al nodo y deben esperar el tiempo requerido para iniciar la transmisión.

En el estado “inicio” se identifican los nodos transmisores del modelo y se les asigna a cada uno su ranura correspondiente dentro del marco TDMA. El tamaño del marco se obtiene en este estado ya que es asignado como parámetro de simulación, es decir puede modificarse sin necesidad de modificar el código del proceso. Posteriormente el proceso se mantiene en el estado “espera”. Si llega un marco SDH al proceso este pasa al estado “fr_src”, en donde en caso de que la ranura actual no sea la correspondiente al nodo, el marco es almacenado en el buffer correspondiente. Si el nodo está transmitiendo en ese

momento entonces el proceso pasa al estado “tx” en el que los marcos son transmitidos al satélite durante el tiempo que dure la ranura a una tasa de 52 Mbps.

En el siguiente capítulo se describen las simulaciones realizadas. Este nodo es utilizado en todas las simulaciones para transmitir al satélite, aún en los casos en que solo se tiene un nodo transmisor en el modelo, lo que solo ocasiona que el marco TDMA esté compuesto por una sola ranura asignada al único nodo transmisor.

VI. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

VI.1 SIMULACIONES REALIZADAS

Una vez implementado el modelo de simulación, presentado en el capítulo anterior, se desarrolló un plan de simulaciones con la finalidad de analizar el comportamiento del sistema en tres escenarios distintos:

- Enlace punto a punto a 52 Mbps. En este caso, se considera la transmisión desde una sola estación terrena hacia el satélite. El enlace satelital permite la transferencia de información entre dos redes ATM, cada una de las cuales se compone de un sólo conmutador. Como se trata de un sólo enlace todo el ancho de banda es asignado a éste, lo cual significa un enlace de 52 Mbps, correspondiente al módulo STM-0 de SDH, el conmutador ATM opera a una velocidad tal, que transmite el número de celdas ATM correspondientes a la carga efectiva del módulo STM-0 en un segundo.
- Enlace punto a punto a 13 Mbps. En este caso, nuevamente se tiene un enlace punto a punto entre dos redes ATM, sólo que durante la transferencia de información a través del segmento satelital sólo se utiliza una cuarta parte del ancho de banda, correspondiente a 13 Mbps, de esta manera la estación terrena de la red fuente lleva al cabo transmisiones mediante un sub-STM-1 de SDH a 13 Mbps. El conmutador ATM en este caso opera a una velocidad correspondiente a la carga efectiva del módulo sub-STM-1 utilizado.

- Enlace con acceso múltiple. En este escenario se tienen cuatro redes ATM como las implementadas en el segundo escenario, pero ahora compartiendo el ancho de banda de 52 Mbps del canal satelital. Cada una de las estaciones terrenas trabaja a 13 Mbps y tiene acceso al satélite mediante TDMA, de manera que debe esperar el tiempo requerido para que la ranura en proceso sea la que le corresponda y pueda enviar su información, en ese instante lleva al cabo transmisiones a 52 Mbps, pero sólo durante el tiempo que se le ha sido asignado previamente para transmitir.

El diseño de estos escenarios se debe a las siguientes consideraciones:

Si es posible utilizar SDH para transmisiones de ATM por satélite, el formato a utilizar, estandarizado por la ITU-T para este medio, es el módulo STM-0 a 52 Mbps, pero debe considerarse que el satélite tiene un ancho de banda limitado y además que el servicio analizado en este trabajo (voz CBR) en general no requiere un gran ancho de banda. Sin embargo, como STM-0 es el formato estandarizado se diseñó el escenario uno con la finalidad de analizar el modelo con este parámetro. Por otra parte, una red satelital real no se compone de un sólo enlace punto a punto, sino que es necesario compartir el ancho de banda del satélite entre varias estaciones, esto significa que en caso de tener estaciones terrenas operando a 52 Mbps, se requeriría un enlace satelital con un ancho de banda mucho mayor como es el caso de STM-1 a 155 Mbps. Para el tráfico estudiado en este trabajo, un enlace de esta capacidad no es conveniente, por lo que la siguiente opción es reducir la tasa de datos de las estaciones terrenas, para tal caso se considera la transmisión

mediante un sub-STM-1 a 13 Mbps, implementado en el segundo escenario. Una vez analizado el comportamiento del modelo en este caso ya es posible llevar al cabo una simulación más cercana a la realidad de una red satelital, incluyendo el acceso múltiple, lo que sucede en el escenario tres.

Es necesario aclarar que comercialmente no existen conmutadores que operen a velocidades de 52 y 13 Mbps, como los utilizados en los modelos aquí estudiados, ya que los que se encuentran en el mercado están diseñados para operar sobre enlaces de fibra óptica a una velocidad mínima de 155 Mbps. Sin embargo, para fines de simulación se implementaron conmutadores con estas características que permitan trabajar a menores tasas de transmisión y que sean compatibles con los módulos STM que se proponen en este trabajo, para ser transmitidos a través de un enlace satelital.

En los primeros dos escenarios se realizaron simulaciones variando el número de fuentes generadoras de llamadas en la red ATM transmisora. Todas estas fuentes están conectadas a un sólo conmutador. Esto con el fin de determinar cual es el número máximo de fuentes generadoras que el conmutador puede soportar sin que se degraden los parámetros básicos de calidad de servicio: retardo y variación en el retardo, para este caso. Otro aspecto importante variado en las simulaciones es la intensidad de tráfico generada por estas fuentes, concepto definido en el capítulo IV, en donde se describe con relación a llamadas realizadas por hora. Para fines de simulación, realizar corridas con duración de 1 hora o más resultan muy poco factibles, sobre todo porque los tiempos de simulación en OPNET

son muy largos, por lo tanto fue necesario llevar al cabo una conversión de este parámetro a segundos. La determinación de la intensidad de tráfico en el modelo se obtiene en base a la duración de las llamadas generadas y el interarribo de estas, los cuales son parámetros que pueden variarse, como se menciona en el capítulo V.

De esta manera se implementaron corridas con duración de tráfico de 30 segundos para los tres escenarios. Se utilizaron 3 semillas de OPNET para cada corrida, obteniendo un promedio de los resultados como resultado final.

Se hicieron pruebas modificando el interarribo y la duración de las llamadas con el fin de determinar las diferencias que pudieran presentarse para casos con mismas intensidades de tráfico pero diferentes parámetros, como puede ser llamadas más largas con interarribos largos o llamadas más cortas con interarribos cortos. Las pruebas permitieron observar que las diferencias pueden considerarse despreciables, por lo que se optó por tener llamadas con una duración de 3 segundos y variar sus interarribos para obtener diferentes intensidades de tráfico, es decir más llamadas por unidad de tiempo. La tabla VII muestra las intensidades utilizadas, el tiempo de utilización corresponde a la utilización que cada fuente hace del canal (duración de llamada x número de llamadas).

Tabla VII. Intensidades de tráfico simuladas.

Tiempo de utilización (seg en 30 seg)	Intensidad de tráfico [Erlangs]
3	0.1
6	0.2
12	0.4
15	0.5
18	0.6
21	0.7
24	0.8
26	0.86
27	0.9
30	1

Las simulaciones realizadas para los dos primeros escenarios permitieron definir:

- 1) El número máximo de fuentes generadoras de llamadas hacia el conmutador ATM.
- 2) La intensidad de tráfico máxima con relación al número de fuentes.
- 3) La capacidad óptima del buffer del conmutador ATM.

Estos puntos se obtuvieron de las simulaciones, en las que se analizaron además los siguientes parámetros:

- Retardo promedio de transferencia de celdas (CTD).
- Retardo máximo en la transferencias de celdas (Max CTD).
- Variación promedio en la transferencia de celdas (CDV).
- Capacidad máxima del conmutador.

Con respecto al tercer escenario, éste se llevó al cabo una vez que se determinaron los aspectos antes mencionados para el caso del enlace punto a punto a 13 Mbps, ya que ahora

se incluye el acceso múltiple hacia el satélite mediante TDMA. Las simulaciones, por lo tanto permitieron determinar :

- 1) Tamaño óptimo de marco TDMA.
- 2) Número máximo de estaciones terrenas soportadas por el enlace.

En este caso se llevaron al cabo variaciones en el tamaño del marco TDMA y en la intensidad de tráfico de las fuentes generadoras, analizando los mismos parámetros que en el caso anterior. Finalmente, se considera la incorporación de funciones de Calidad de Servicio en el conmutador, lo que permite analizar un parámetro más: La relación de celdas perdidas (CLR), aunque no con la exactitud requerida, ya que para el caso del servicio analizado en este trabajo (CBR) esta relación es del orden de 10^{-7} , para lo cual en las simulaciones realizadas tendrían que haberse generado por lo menos 10^7 celdas, con el fin de tener por lo menos una celda perdida, desafortunadamente los tiempos de simulación en OPNET son de muy larga duración, por lo que no fue posible realizar simulaciones que generaran dicho número de celdas, siendo el número máximo de celdas generadas del orden de 10^5 . Por otra parte, las celdas perdidas están muy relacionadas con los errores que se presentan en el canal satelital, es decir, en la capa física, la cual no es analizada en este trabajo, por lo que un estudio más específico del parámetro CLR requeriría aspectos no considerados aquí ya que el trabajo resultaría muy extenso, además de que este es el parámetro de calidad de servicio que menos afecta al tráfico CBR, por lo que en esta investigación se optó por analizarlo con menos detalle.

VI.2 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las primeras simulaciones realizadas se llevaron al cabo con la finalidad de determinar el retardo de propagación descrito en el capítulo anterior. Este retardo, después de varias corridas resultó ser de aproximadamente 250 ms, tal como lo indica la teoría, es decir un RTT (“Round-Trip time”, tiempo de viaje redondo) de 500 ms. En base a esto y con el fin de no sobrepasar los 400 ms del CTD determinado por la ITU-T, como puede observarse en la tabla V del capítulo IV para enlaces de este tipo (Clase1), el segmento terrestre de la red no debe provocar un retardo mayor de 150 ms (más los 250 ms de propagación se tienen los 400 ms del CTD). Este retardo puede ser provocado principalmente por el procesamiento y el almacenamiento en el conmutador ATM, ya que los otros elementos del sistema producen un retardo casi insignificante. En base a la ecuación 5 del capítulo IV es posible determinar el tamaño en celdas ATM del buffer del conmutador que no exceda los 150 ms. Esta ecuación considera la tasa de drenado del buffer, basada en la tasa de operación del conmutador y el retardo de procesamiento, como se muestra en las próximas secciones. El retardo de procesamiento del conmutador en el modelo diseñado se considera de 1 μ s, el cual es un valor típico para conmutadores ATM comerciales.

VI.2.1 RESULTADOS PARA EL ENLACE PUNTO A PUNTO A 52 MBPS

En este escenario el conmutador ATM procesa 112,000 celdas/s, ya que es la capacidad de la carga útil del marco STM-0, como se especifica en el capítulo V. Considerando el retardo de procesamiento de 1 μ s, la tasa de drenado del buffer del conmutador ATM de la red transmisora, en base a la ecuación 6 del capítulo IV, para este caso es de:

$$\text{Tasa de drenado del buffer} = \frac{1}{\frac{1}{112000} + \frac{1}{1000000}} = 100,719 \text{ celdas/s}$$

El tamaño del buffer en celdas ATM para este caso será:

$$\text{Tamaño de buffer} = (0.150) \text{ s} \times 100,719 \text{ celdas/s} = 15,107 \text{ celdas ATM}$$

Con un buffer de esta capacidad para este escenario no se excederán los 400 ms de CTD.

Las simulaciones realizadas permiten observar como a medida que se incrementa el tamaño del buffer el CTD máximo aumenta. El mínimo para este caso son los 250 ms de retardo de propagación, el límite de 400 ms se alcanza al tener un buffer con la capacidad antes determinada. Esto se muestra en la figura 24, donde puede observarse el retardo máximo en la transferencia de celda con relación al tamaño del buffer. Cabe señalar que el retardo máximo no es el que experimentan todas las celdas transmitidas, sino que puede ser el alcanzado incluso por sólo una celda, que llegue al conmutador cuando el buffer se encuentra en su máxima capacidad y por tanto debe esperar los 150 ms para poder ser

atendida, ya que el buffer, como se ha mencionado anteriormente opera bajo el esquema FIFO (primer llegada, primera salida).

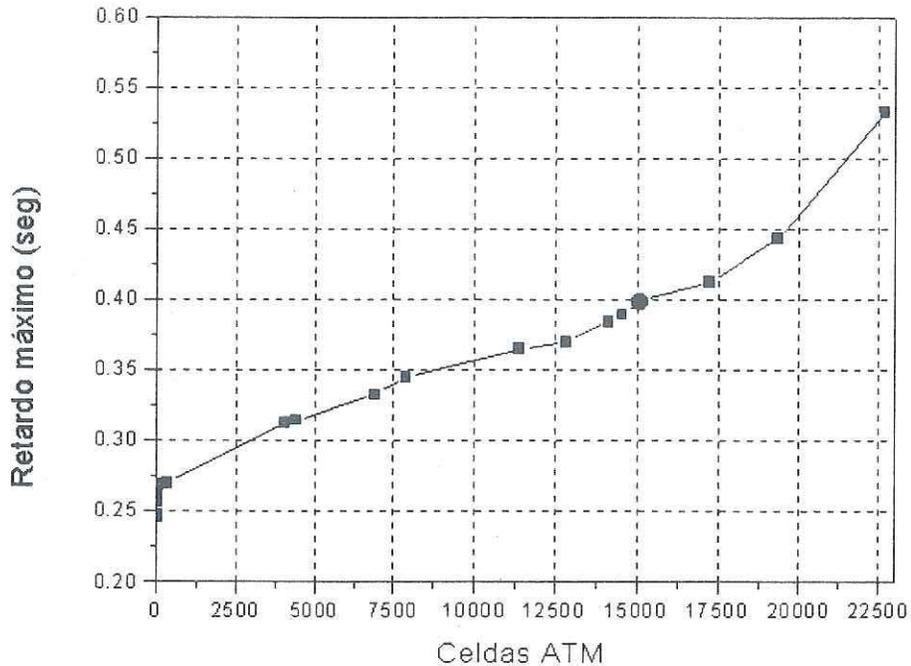


Figura 24. Capacidad del conmutador ATM y retardo máximo en la transferencia de celdas a 52 Mbps.

Una vez determinado el tamaño del buffer, es importante obtener el número máximo de fuentes generadoras de llamadas que el sistema podrá soportar, así como la intensidad de tráfico con la que funcionarán, ya que esto determina hasta donde crecerá el buffer y por tanto la cantidad de tráfico que podrá soportar para no exceder el CTD. Para ello, en este caso se comenzó con 540 fuentes, las cuales se fueron incrementando gradualmente. En la figura 25 puede observarse como a medida que el número de fuentes aumenta se alcanza el límite del buffer a intensidades de tráfico menores y cada vez la rapidez con que el buffer se llena es mayor con el incremento del número de fuentes y la intensidad de tráfico. De esta manera, con 900 fuentes se tiene un cambio tan grande en el tamaño del buffer incluso

a intensidades de tráfico bajas (menores que 0.4 Erlangs), por lo que en la figura 25 sólo se muestran tres puntos para este parámetro. Puede observarse como 540 fuentes no provocan incrementos significativos en el tamaño del buffer, sin embargo un incremento de solo 60 fuentes más provoca que se exceda la capacidad máxima calculada.

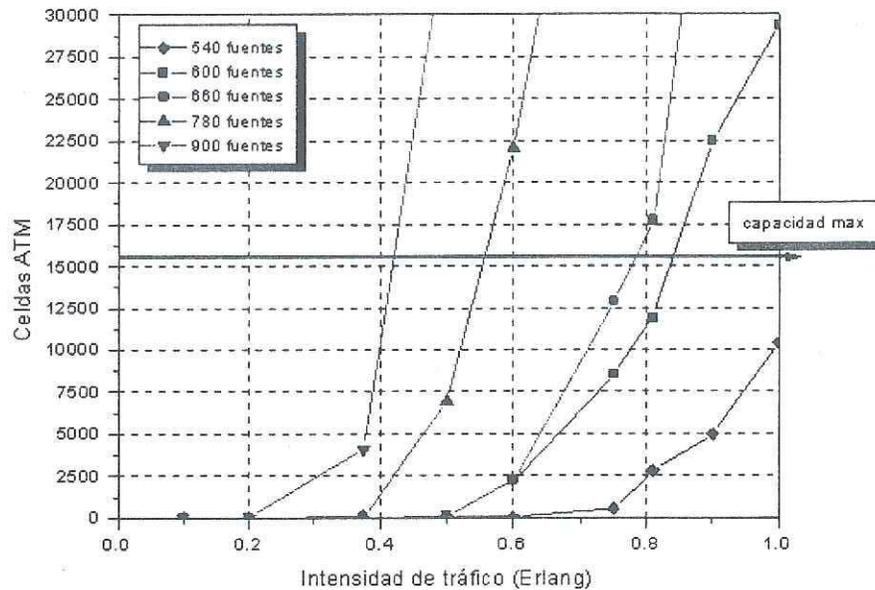


Figura 25. Capacidad del buffer en relación al número de fuentes y la intensidad de tráfico a 52 Mbps

Como se muestra en la figura 24, el retardo de transferencia de celdas está muy relacionado con el tamaño del buffer del conmutador, por lo que la figura 25 permite observar como este último parámetro aumenta con la intensidad de tráfico y el número de fuentes. Comparando la figura 25 con la figura 26, donde se muestra el retardo máximo, puede observarse la relación antes mencionada, de manera que cuando se excede la capacidad máxima calculada, se excede de igual manera el CTD máximo, lo que sucede a partir de 600 fuentes con intensidades de tráfico mayores a 0.84 ó para 660 fuentes poco antes de

alcanzar intensidades de tráfico de 0.8 (aprox. 0.78 Erlangs). En la figura 25 se muestran los resultados para 780 y 900 fuentes, estos no se incluyen en la figura 26 ya que los retardos llegan a exceder incluso 1 segundo, el cual es un retardo completamente inaceptable. Para 540 fuentes el retardo máximo nunca excede el CTD máximo permitido.

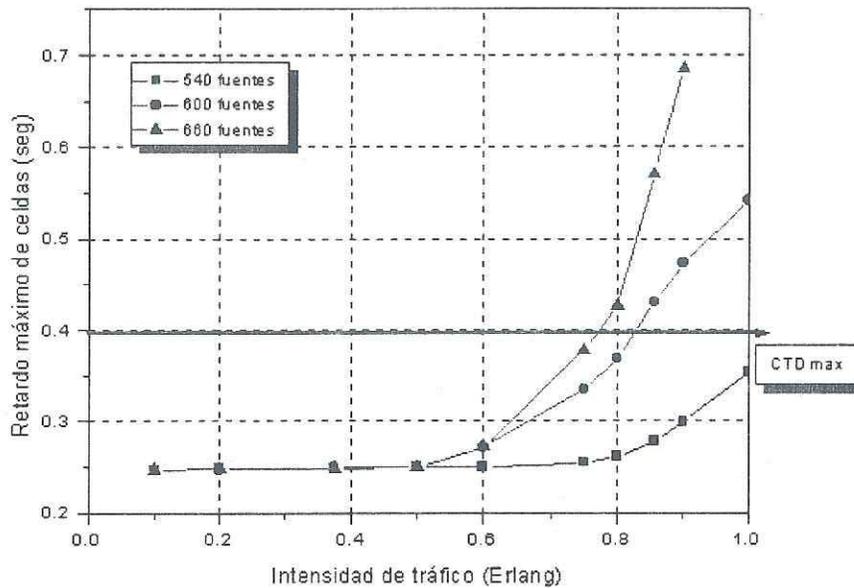


Figura 26. Retardo máximo de transferencia de celdas a 52 Mbps

El retardo máximo es el valor que especifica la ITU-T como el CTD máximo que una celda puede sufrir como retardo de transferencia, sin embargo no todas las celdas en los casos antes presentados tendrán el mismo retardo.

La figura 27 muestra el retardo promedio en la transferencia de las celdas, el cual obviamente resulta menor al retardo máximo y es el valor promedio de los retardos experimentados por las celdas. Para el caso de 660 fuentes en todas las gráficas antes

presentadas, no se obtuvieron resultados para intensidades mayores a 0.9, debido a que estos ya sobrepasaban en exceso los valores máximos permitidos y provocaban corridas de simulación con duraciones muy largas, lo mismo sucedió con 780 y 900 fuentes, por lo que no se presentan los valores correspondientes a todas las intensidades de tráfico hasta alcanzar 1 Erlang.

En la figura 28, se hace una comparación entre el retardo máximo y el retardo promedio, aquí es posible observar que a partir de intensidades mayores a 0.5 se presenta una diferencia notoria entre estos retardos, debido a que es en estas intensidades donde el buffer comienza a tener un aumento considerable por el tráfico recibido. La figura 28 sólo muestra los valores correspondientes a 540 y 600 fuentes con el fin de lograr una mejor apreciación entre las diferencias de ambos valores.

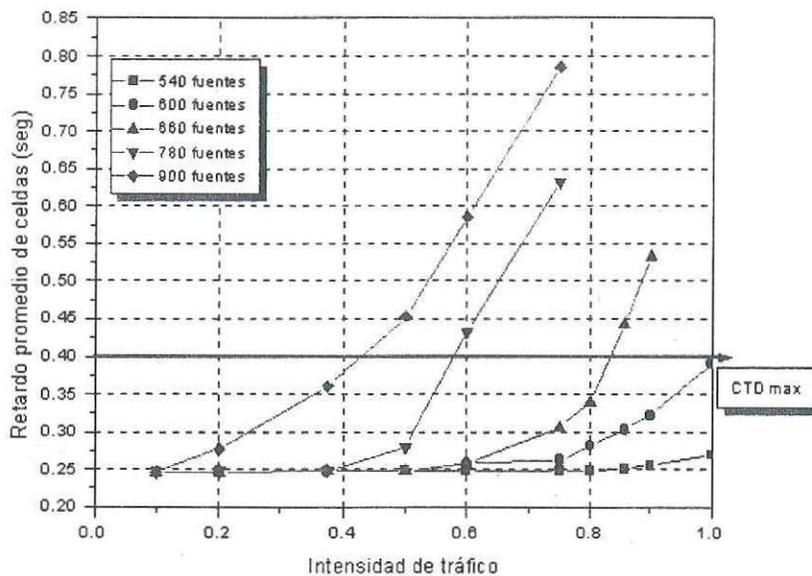


Figura 27. Retardo promedio de transferencia de celdas a 52 Mbps

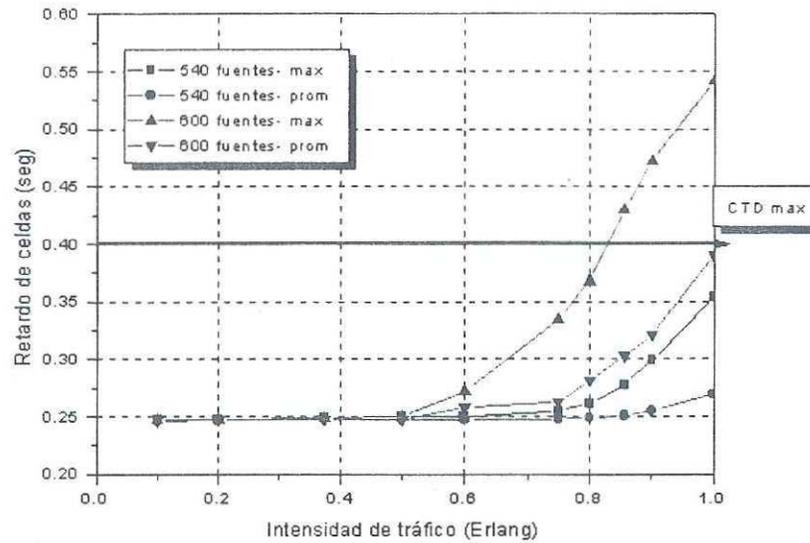


Figura 28. Comparación entre el retardo promedio y máximo de transferencia de celdas a 52 Mbps

Finalmente, para este escenario a 52 Mbps se analizó el comportamiento de la variación promedio en el retardo de celdas. Como se mencionó anteriormente, no todas las celdas tienen el mismo retardo. Aún cuando siempre experimenten el mismo retardo de propagación, cada una llega a distintos tiempos al buffer del conmutador y dependiendo de la cantidad de celdas almacenadas hasta ese momento, éstas experimentarán mayor o menor retardo debido al tiempo que les llevará ser atendidas.

La figura 29 muestra los resultados obtenidos para esta variación promedio en el retardo con respecto al número de fuentes y la intensidad de tráfico.

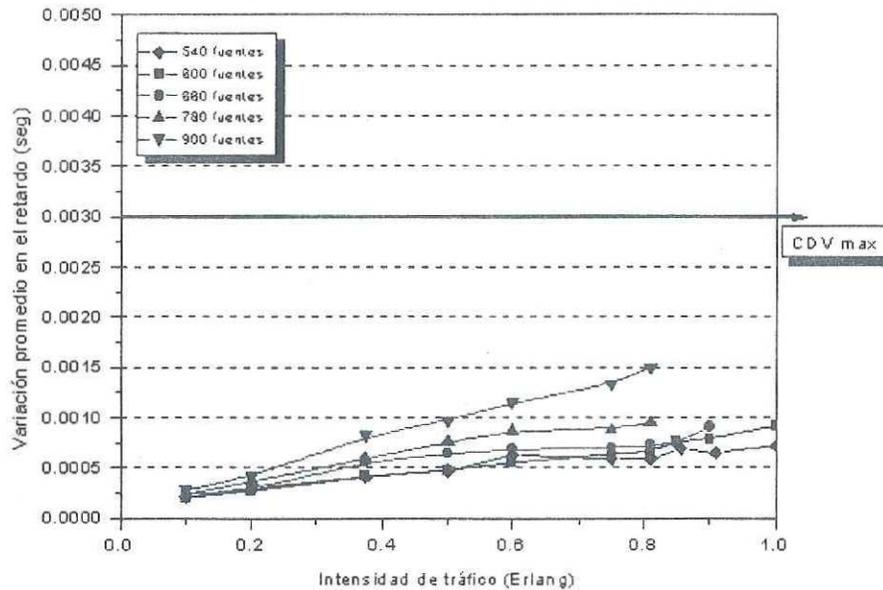


Figura 29. Variación promedio en el retardo de celdas (CDV) a 52 Mbps.

La Variación en el retardo de celdas (CDV) establecida por la ITU es de 3 ms para el servicio de tasa constante (CBR). Como puede observarse, los resultados obtenidos se mantienen muy abajo de este límite, aunque tienden a incrementar significativamente conforme aumenta el número de fuentes y la intensidad de tráfico.

Analizando estos resultados es posible considerar que este aumento se debe principalmente al tiempo requerido de espera por las celdas iniciales en el buffer, es decir, la primer celda que llega deberá esperar sólo el tiempo que le toma al buffer procesarla y agregar a esto el tiempo de propagación así como el de procesamiento en el destino. Este tiempo seguirá aumentando conforme el buffer llega hasta su capacidad máxima, siendo los 150 ms de

capacidad del buffer la diferencia mayor entre retardos que pueda presentarse. Una vez que el buffer está lleno, todas las celdas deberán esperar el mismo tiempo, por lo que la variación promedio a partir de aquí resulta mucho menor que los 150 ms ya que son muy pocas las celdas que presentan variaciones tan grandes. Para pocas fuentes y con bajas intensidades se ha comprobado que el buffer no alcanza su capacidad máxima, por lo que la variación también es menor. Sin embargo para el caso de 900 fuentes esta variación aumenta mucho más con la intensidad de tráfico, dado que este número de fuentes excede la capacidad máxima del buffer calculada al inicio de esta sección.

VI.2.2 RESULTADOS PARA EL ENLACE PUNTO A PUNTO A 13 MBPS

En este escenario se considera que el conmutador ATM procesa 24,000 celdas/s, ya que para este caso se está considerando que la transmisión se llevará al cabo a través de un módulo sub-STM-1 a 13 Mbps (12.9 Mbps), el cual se forma de 2 x VC-2 y contiene 288 bits de encabezado, tal como el STM-0. Dado que la carga efectiva de cada marco es de 3 celdas ATM y debido a que se transmiten 8000 marcos/s, es posible transmitir las 24,000 celdas/s que procesa el conmutador.

Considerando nuevamente el retardo de procesamiento de 1 μ s del conmutador, la tasa de drenado del buffer del conmutador ATM en la red transmisora, en base a la ecuación 6 del capítulo IV, para este caso es de:

$$\text{Tasa de drenado del buffer} = \frac{1}{\frac{1}{24000} + \frac{1}{1000000}} = 23,438 \text{ celdas / s}$$

El tamaño del buffer en celdas ATM para este caso será:

$$\text{Tamaño de buffer} = (0.150) \text{ s} \times 23\,438 \text{ celdas/s} = 3,516 \text{ celdas ATM}$$

Con un buffer de esta capacidad para este escenario no se excederán los 400 ms máximos permisibles de CTD.

Las simulaciones realizadas, tal como en el caso correspondiente al enlace de 52 Mbps permiten observar como a medida que se incrementa el tamaño del buffer el CTD máximo aumenta. El retardo mínimo se mantiene en los 250 ms de retardo de propagación, y el límite de 400 ms se alcanza al tener un buffer con la capacidad antes determinada. En la figura 30 se puede observar el retardo máximo en la transferencia de celdas con relación al tamaño del buffer.

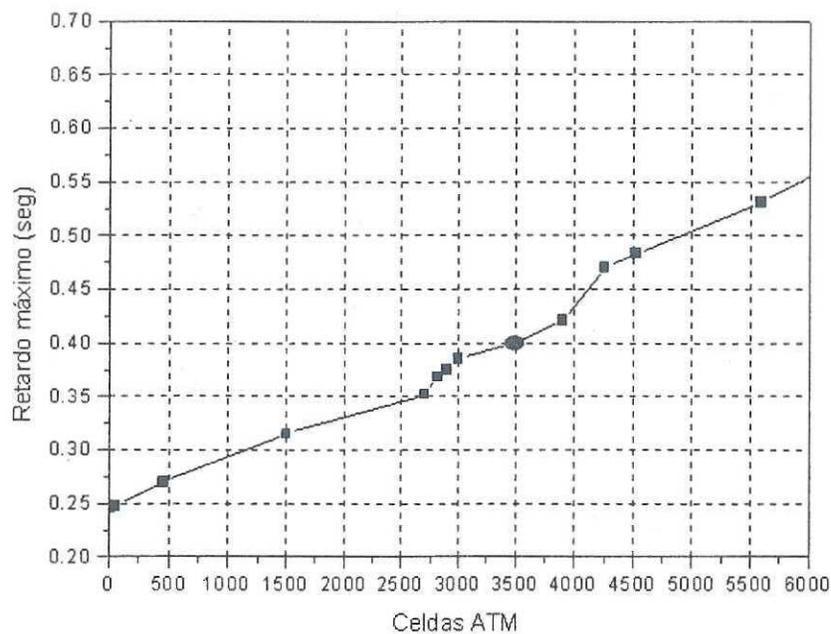


Figura 30. Capacidad del conmutador ATM y retardo máximo en la transferencia de celdas a 13 Mbps.

Las simulaciones realizadas posteriormente permiten determinar cual es el número óptimo de fuentes para operar con estos parámetros. En la figura 31 se puede observar como se incrementa la carga del conmutador con el número de fuentes y la intensidad de tráfico de éstas. Con 160 fuentes o menos el buffer del conmutador no alcanza en ningún momento la capacidad máxima antes calculada, sino que se mantiene muy por debajo de ella. Sin

embargo, un incremento de 50 fuentes ocasiona un aumento considerable en las celdas que llegan al buffer, sobrepasando la capacidad máxima desde intensidades de tráfico menores a 0.9 Erlangs (0.88 Erlangs aproximadamente). Para 240 y 300 fuentes estos incrementos son cada vez mayores sobrepasando esta capacidad a menores intensidades de tráfico (aproximadamente 0.76 y 0.42 respectivamente), por lo tanto ya no se realizaron simulaciones con más fuentes. Como puede observarse, a mayor número de fuentes el crecimiento del buffer es sustancialmente mayor con bajas intensidades de tráfico, manteniéndose bajo sólo a intensidades de 0.1 y 0.2 Erlangs.

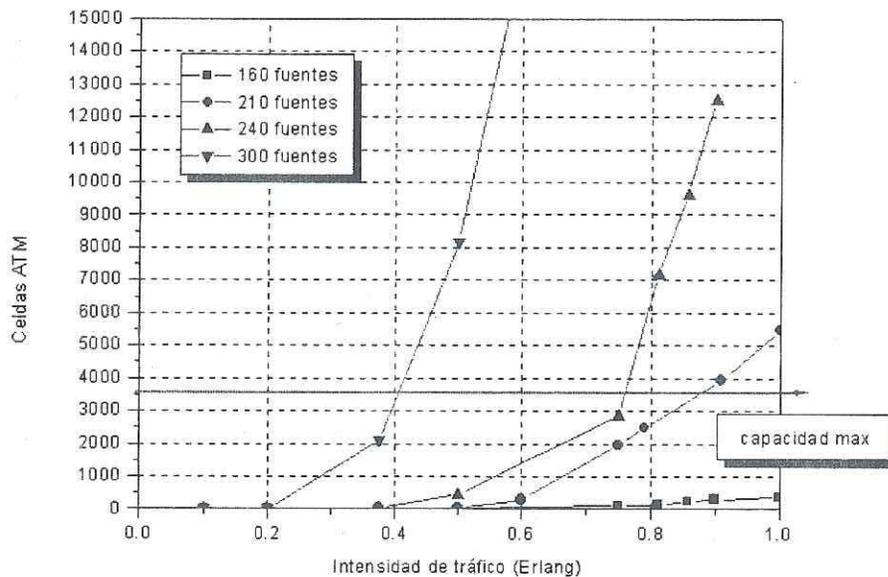


Figura 31. Capacidad del buffer en relación al número de fuentes y la intensidad de tráfico a 13 Mbps

En la figura 32 se puede observar como aumenta el retardo máximo de transferencia de celdas en relación con el incremento en el tamaño del buffer presentado en la figura 31. Con 160 fuentes o menos este retardo se mantiene muy abajo de los 400 ms, para 210

fuentes este se excede a intensidades de tráfico mayores a 0.9 Erlangs, y con 240 fuentes se excede poco antes de alcanzar 0.8 Erlangs (0.78 aproximadamente). En la gráfica no se presentan los resultados para 300 fuentes, ya que como se observa en la figura 31, con este número de fuentes la capacidad se excede de manera abrupta al llegar a los 0.5 Erlangs. Lo mismo sucede con el retardo máximo, que pasa de 333 ms hasta los 600 ms y continúa creciendo de esta manera. Es posible inferir a partir de estos resultados que al tener más fuentes el retardo crecerá mucho más rápido al pasar de una intensidad de tráfico a otra, debido a que se genera un número mayor de celdas por segundo simultáneamente.

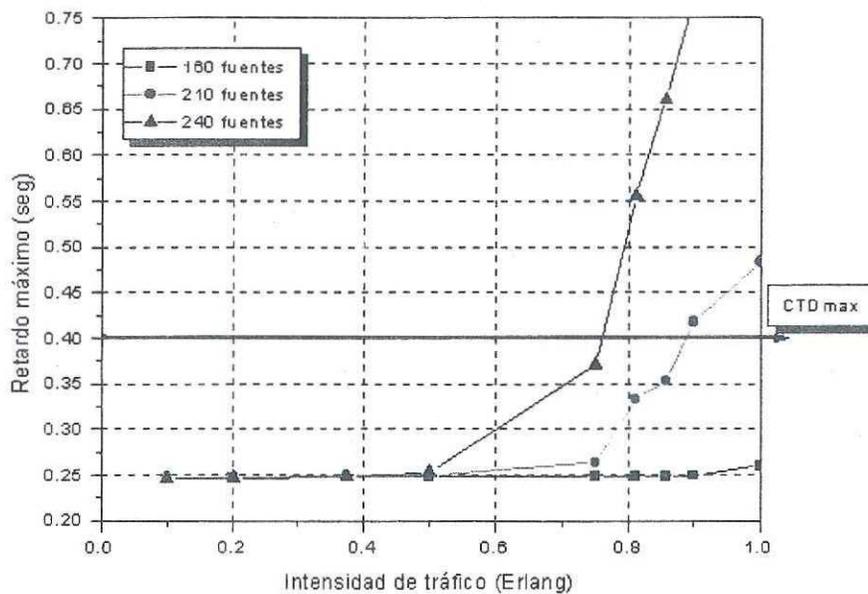


Figura 32. Retardo máximo de transferencia de celdas a 13 Mbps

Al igual que en el escenario correspondiente al enlace punto a punto a 52 Mbps, para este escenario se obtuvo también el retardo promedio en la transferencia de celdas, el cual resulta ser obviamente menor al retardo máximo. Esto sucede ya que no todas las celdas

llegan al buffer cuando éste se encuentra totalmente lleno, de manera que aún cuando en la figura 31 se observa como la capacidad máxima del buffer es excedida aproximadamente a los 0.9 Erlangs de intensidad de tráfico para el caso de 210 celdas, en la figura 33 correspondiente al retardo promedio puede verse como éste se mantiene abajo de los 400 ms incluso para intensidades de 1 Erlang. Lo cual significa que son pocas las celdas que sobrepasan los 400 ms de retardo. A medida que se incrementa el número de fuentes puede observarse como el retardo promedio permanece superior al CTD máximo en las mismas intensidades que el retardo máximo, esto debido a que, como se mencionó anteriormente, el tamaño del buffer comienza a crecer cada vez más rápido, provocando diferencias muy grandes en los retardos al pasar de una intensidad de tráfico a otra.

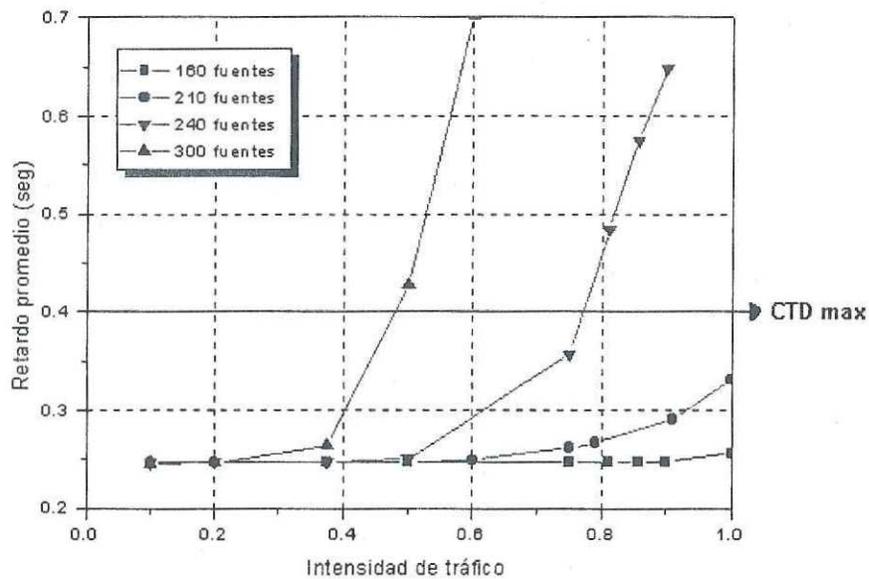


Figura 33. Retardo promedio de transferencia de celdas a 13 Mbps

La figura 34 muestra como la diferencia entre los retardos máximo y promedio aumenta considerablemente conforme se tienen más fuentes, aquí sólo se presentan los resultados para 160 y 210 fuentes para una mejor apreciación. Este es el caso donde la diferencia es mas notoria, debido a que para 160 fuentes el buffer no crece tanto como en los otros casos.

En la misma figura 34 se puede ver que conforme se aumenta el número de fuentes la separación entre ambos retardos, que para el caso de 210 fuentes se da a partir de 0.5 Erlangs, sucede cada vez a intensidades menores. Esto es resultado del incremento en el buffer del conmutador, ya que el retardo de propagación permanece estable.

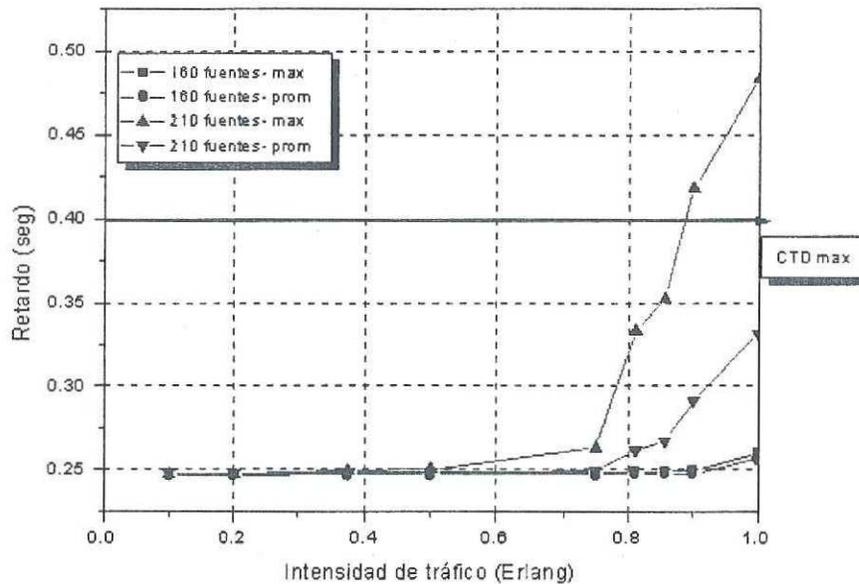


Figura 34. Comparación entre el retardo promedio y máximo de transferencia de celdas a 13 Mbps

Por último, para este escenario, se muestra en la figura 35 la variación promedio en el retardo, ya que no todas las celdas tienen el mismo retardo, esto provocado básicamente por el crecimiento del buffer. Este valor se mantiene muy por debajo del límite de 3 ms y no presenta diferencias considerables entre los números de fuentes analizadas, sin embargo aumenta conforme crece el número de éstas así como la intensidad de tráfico. Entre 160 y 210 celdas existe una diferencia que ya no es notoria entre 210 y 240 celdas, donde esta variación es casi la misma durante todas las intensidades de tráfico. Al pasar a 300 celdas esta variación aumenta y la diferencia es mayor conforme se tiene un incremento en la intensidad de tráfico.

Analizando la figura 35 puede decirse que si se tiene más de 300 fuentes, esta variación se incrementará cada vez más conforme se aumente la intensidad de tráfico, ya que el buffer crecerá mas rápidamente, como ya se ha observado en figuras anteriores.

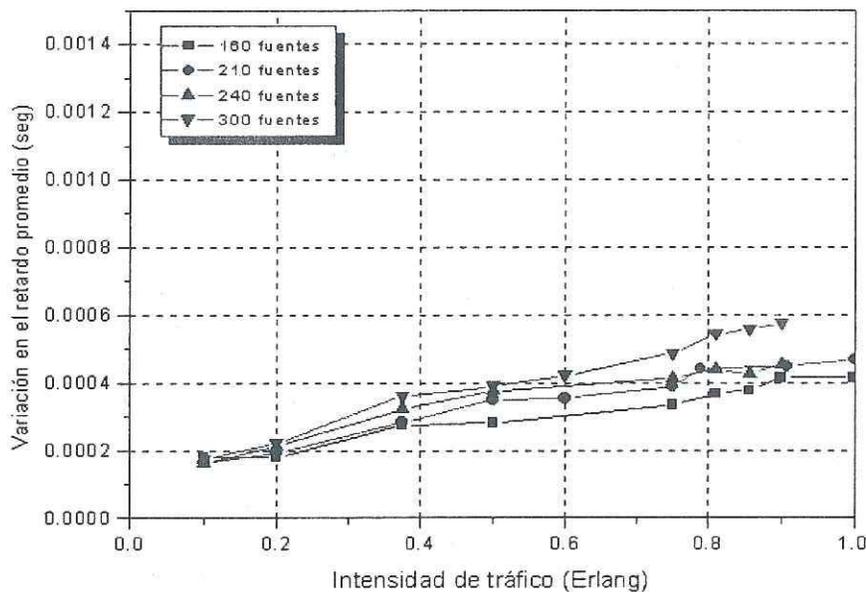


Figura 35. Variación promedio en el retardo de celdas a 13 Mbps.

VI.2.3 CONCLUSIONES PARA ENLACES PUNTO A PUNTO

En los escenarios uno y dos se analizó el modelo considerando únicamente enlaces punto a punto a tasas de transmisión digital de 52 y 13 Mbps.

En el primer caso (52 Mbps) puede concluirse que el sistema es capaz de operar de manera adecuada con 660 fuentes o menos, ya que de otra manera se exceden de manera considerable los parámetros de calidad (CTD y CDV básicamente). En el caso de un enlace a 13 Mbps, el número óptimo de fuentes se considera que debe ser menor de 210 por los mismo motivos. En ambos casos es posible considerar la utilización de un mayor número de fuentes pero con intensidades de tráfico bajas, lo cual no resulta muy lógico, ya que se tendría una red subutilizada. Al incrementar el número de fuentes los aumentos en el tamaño del buffer son cada vez mas grandes conforme se incrementa la intensidad de tráfico, por lo tanto es cada vez mas difícil predecir el comportamiento del sistema en cuanto a parámetros de calidad. Sin embargo, puede decirse que el número soportado de fuentes está en relación directa a la velocidad de transmisión del enlace. En todos los casos la fuentes tienen una tasa de datos de 64 kbps, es decir cada fuente genera 170 celdas/segundo. Con 660 fuentes, todas operando a una intensidad de tráfico de 1 Erlang, se sobrepasa la capacidad de la carga efectiva del módulo STM utilizado para la transmisión (47, 488, 000 bps), y lo mismo sucede para el segundo caso con 210 fuentes.

Los retardos máximos obtenidos en ambos casos son producto directo del tamaño del buffer utilizado. Los retardos promedios permiten observar que no todas las celdas

alcanzan este retardo máximo. De igual manera se puede notar como la variación promedio en el retardo es mayor para el caso del enlace a 52 Mbps. Se puede concluir que esto también es resultado del tamaño del buffer, que es mayor para el primer caso, ya que serán más las celdas que tendrán que acumularse antes de alcanzar la capacidad máxima y por lo tanto se presenta una mayor variación en el retardo. Sin embargo en ningún caso se alcanza el valor del CDV máximo permitido.

VI.2.4 RESULTADOS PARA EL ENLACE CON ACCESO MÚLTIPLE TDMA

El tercer escenario de simulación consiste en cuatro redes como la analizada en el segundo escenario, pero en este caso, éstas hacen uso del satélite a través de la técnica de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). Con base en las simulaciones realizadas para el segundo escenario con tasa de transmisión de 13 Mbps, se considera que 210 fuentes de tráfico de voz CBR es un número adecuado de fuentes por los resultados obtenidos. De manera que las simulaciones para este caso se realizaron con este parámetro.

En las corridas de simulación se varió el tamaño del marco TDMA. Como se menciona en el capítulo II, este marco debe ser de un tamaño tal que incluya tiempos de guarda y preámbulos, no sólo las ráfagas de información, para evitar traslapes.

Las estaciones terrenas transmiten módulos sub-STM-1, en los que cada marco SDH es de 1560 bits, los cuales se componen en su carga efectiva de 3 celdas ATM (1272 bits) y de los 288 bits de encabezado, tal como un módulo STM-0. Como los marcos SDH que componen el sub-STM-1 serán transmitidos a 51.84 Mbps por el canal satelital, esto significa que para que se transmita un marco se requieren:

$$\frac{1560 \text{ bits}}{51.84 \text{ Mbps}} = 30.1 \mu\text{s}$$

En tal caso y sin considerar preámbulos o tiempos de guarda, el marco TDMA mínimo debería ser de 120.4 μ s. En la práctica, la ranura mínima que se utiliza para el caso de voz, es de 125 μ s, esto con el fin de ser compatible con la tasa de muestreo PCM.

Otra consideración importante en la elección del tamaño de marco TDMA a utilizar es su eficiencia, la cual está dada en base a la relación que exista entre la carga efectiva, es decir, las ráfagas de datos, y los tiempos de guarda y preámbulo. Marcos grandes permiten enviar más información debido al uso de menos preámbulo, aunque aumentan el retardo en la transmisión. Los marcos chicos permiten tener menos retardo pero se consideran menos eficientes por que tienen un encabezado mayor en relación a la información efectiva que contienen. Por tanto se considera que los marcos TDMA de mayor tamaño son mas eficientes, ya que es posible transmitir mas ráfagas de datos manteniendo el mismo preámbulo, pero agregando los tiempos de guarda entre cada una de las ráfagas.

Otro aspecto importante es el tamaño del buffer TDMA que la estación terrena requerirá, ya que la información no será transmitida inmediatamente después de su generación, sino que ésta debe ser almacenada en la estación terrena hasta que la ranura en el marco TDMA sea la correspondiente a la estación para que ésta pueda comenzar a transmitir. Conforme aumente el tamaño del marco, es posible que a las estaciones se les asignen tiempos mayores para transmitir, sin embargo también tendrán que esperar una mayor cantidad de tiempo mientras las otras estaciones transmiten, por lo que requerirán un buffer de mayor

tamaño. Esto tiene un impacto significativo en el retardo de la transferencia de celdas, ya que no solo tendrán que esperar a ser atendidas en el conmutador ATM, si no además en el buffer TDMA de la estación terrena.

En las simulaciones realizadas se consideran marcos TDMA de 500 μ s, 1, 10, 20 y hasta 100 ms. Debido a que los marcos SDH se generan cada 125 μ s, no es conveniente utilizar un marco TDMA de 125 μ s. Esto debido a que el marco TDMA debe ser dividido en ranuras para cada una de las estaciones transmisoras, en este caso se tienen 4 estaciones, por lo que las ranuras serían de 31.25 μ s. En este tiempo las estaciones aún no tendrían marcos SDH generados para transmitir, por esto se descarta la utilización de dicho tamaño de marco TDMA.

Como se tiene una red formada por 4 estaciones, para el caso de un marco TDMA de 500 μ s, a cada estación se le asigna una ranura de 124 μ s, la cual incluye tiempos de guarda, considerando por lo tanto un preámbulo de 4 μ s (207 bits). Esto significa que cada estación deberá esperar 376 μ s y después transmitir su información durante 124 μ s. Durante este tiempo se generan 3 marcos SDH, que será el máximo tamaño que alcanzará el buffer en cada estación para este tamaño de marco. Con marcos de mayor duración las estaciones podrán transmitir por más tiempo, pero se necesitarán buffers de mayor tamaño y además se incrementa el retardo total del sistema.

Considerando el mismo preámbulo es posible realizar cálculos para cada uno de los marcos propuestos, obteniendo los tamaños de buffer máximos presentados en la tabla VIII.

Tabla VIII .Tamaño del buffer de cada estación terrena

Marco TDMA	Tamaño del buffer	
	Marcos SDH	Bits
500 μ s	3	4,680
1 ms	6	9,360
10 ms	60	93,600
20 ms	120	187,200
100 ms	600	936,000

Los retardos agregados con el marco TDMA consisten básicamente en el tiempo necesario de espera, el cual para 500 μ s es de 376 μ s. No todas las celdas incrementarán su retardo de esta manera, ya que durante el tiempo de transmisión en su ranura correspondiente, se tendrá oportunidad de transmitir tanto lo almacenado en el buffer, como los marcos que se generen en ese instante, si es que eso sucede. La velocidad de transmisión durante ese instante será de 51.84 Mbps, como ya se ha mencionado.

En la figura 36 se muestra como el retardo se va incrementando conforme se tiene un marco mayor de TDMA. Cabe señalar que un marco de 100 ms puede parecer ilógico para un sistema donde lo que se busca básicamente son los parámetros que ocasionen el menor retardo posible. Sin embargo se consideró como alternativa en base a los resultados obtenidos inicialmente en el retardo promedio para 210 fuentes o menos, donde parecía contarse con hasta 100 ms de tolerancia antes de alcanzar los 400 ms de CTD máximo. De hecho en la figura 36, correspondiente al retardo promedio, aún con este tamaño de marco TDMA no se exceden los 400 ms, aunque sí puede notarse la diferencia sustancial con relación a las otros marcos de tamaños mucho menores.

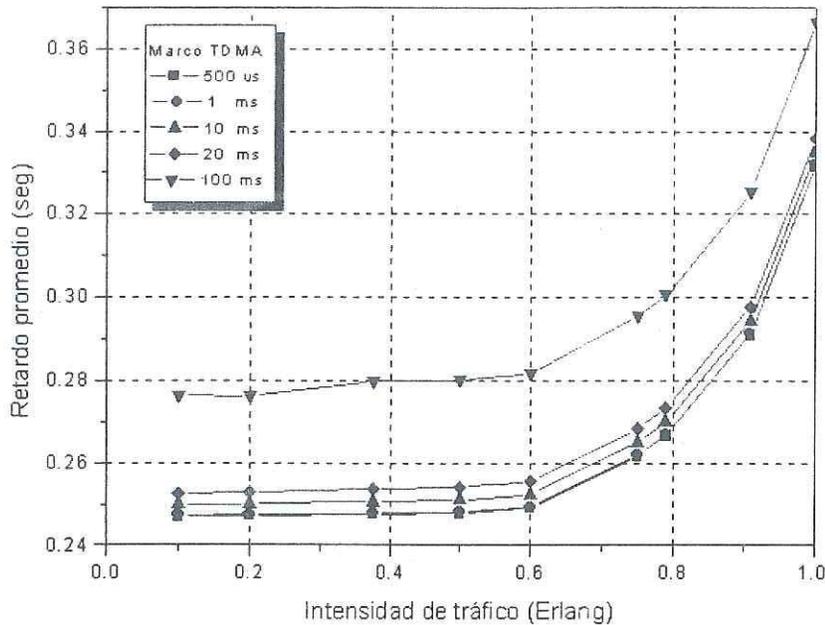


Figura 36. Retardo promedio de transferencia de celdas con diferentes tamaños de marco TDMA

Las diferencias en el retardo entre cada uno de los marcos pueden obtenerse analizando el tiempo de espera, tal como se hizo para determinar el tamaño máximo que alcanzará el buffer para cada marco TDMA. Estos retardos se muestran en la tabla IX. Estas diferencias no corresponden a las que se presentan en la figura 36 debido a que se trata del retardo promedio. Los valores presentados en la tabla IX corresponden al retardo máximo que tendrá que esperar una celda, o más precisamente un marco SDH en caso de ser generado mientras la estación terrena no se encuentre transmitiendo.

Tabla IX. Retardos máximos debidos al tamaño del marco TDMA

Marco TDMA	Retardo
500 μ s	376 μ s
1 ms	747 μ s
10 ms	7.5 ms
20 ms	15 ms
100 ms	75 ms

En la figura 37 se muestran los retardos máximos de transferencia de celdas para cada uno de los marcos TDMA. Las diferencias entre las curvas en este caso sí corresponden a los mostrados en la tabla IX, y como puede observarse el CTD máximo es excedido notoriamente para intensidades de tráfico mayores a 0.8 Erlangs. Un marco de 100 ms ocasiona retardos muy altos. Igual que en los casos anteriores, las diferencias entre el retardo promedio y el retardo máximo son significativas.

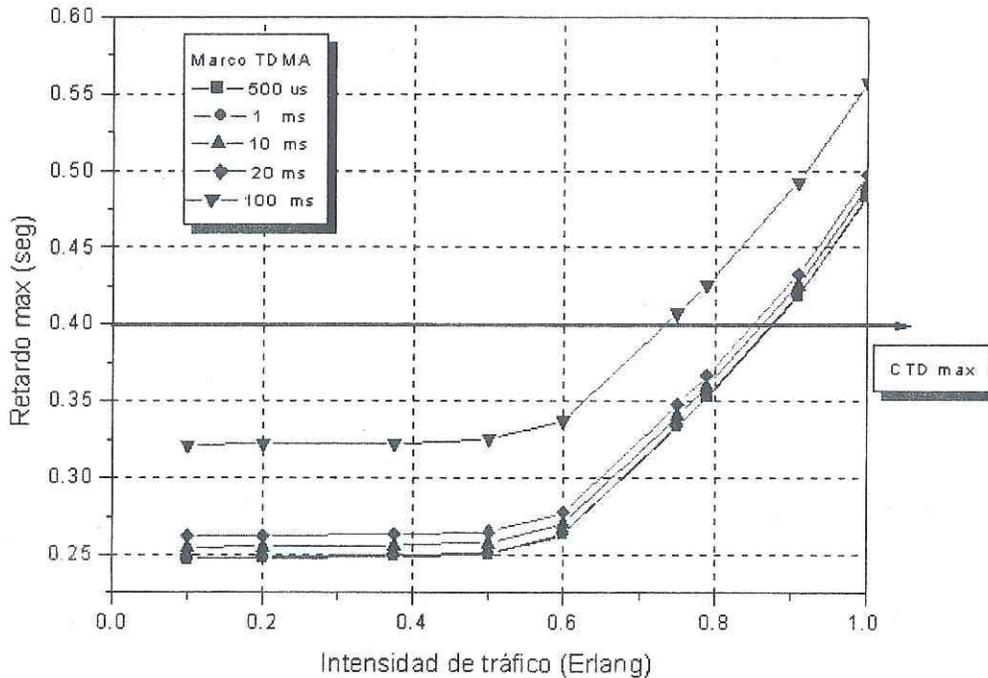


Figura 37. Retardo máximo de transferencia de celdas con diferentes tamaños de marco TDMA

Las figuras 36 y 37 obtenidas como resultados de simulaciones realizadas permitieron comprobar el aumento en el retardo conforme se tienen mayores marcos TDMA, y este aumento corresponde al calculado y mostrado en la tabla IX. Por lo que los resultados mostrados se comportan según lo esperado.

A partir de la figura 38 se analiza la variación en el retardo provocada por incluir el acceso múltiple al modelo. En esta figura se muestran las curvas correspondientes al modelo sin TDMA y con TDMA utilizando un marco de 500 μ s. Como puede observarse, la variación en el retardo aumenta al utilizar TDMA, lo cual resulta lógico, aunque conforme se aumenta la intensidad de tráfico la diferencia entre ambas curvas tiende a disminuir. Aún así, la variación promedio en el retardo se mantiene muy abajo del límite de 3 ms, el cual no se muestra en la gráfica para una mejor apreciación de las curvas.

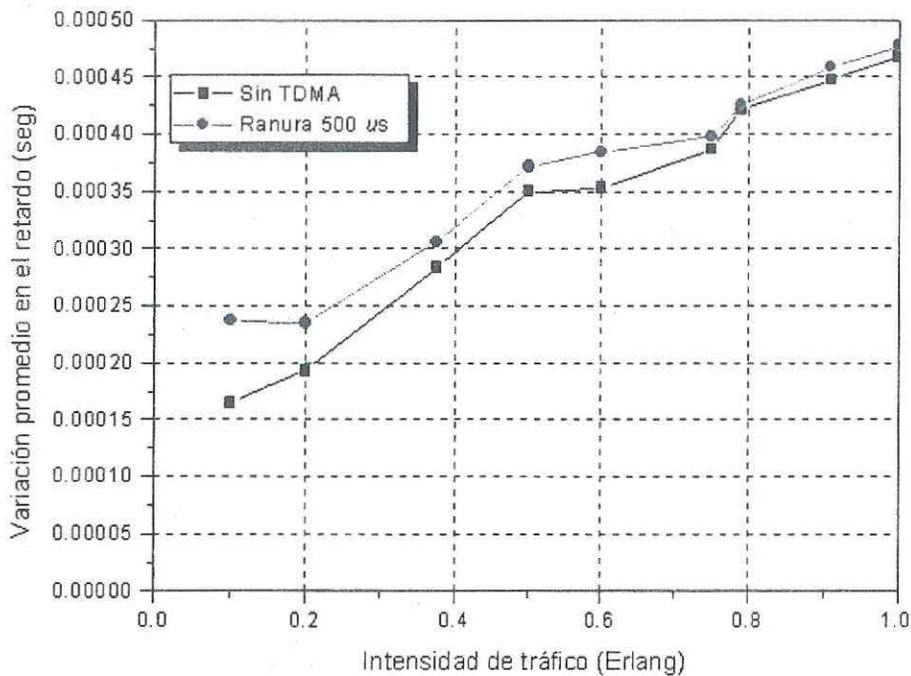


Figura 38. Comparación entre la variación promedio para un enlace punto a punto y con TDMA

A medida que se aumenta el tamaño del marco TDMA, también se tiene un aumento considerable en la variación del retardo. Esto puede observarse en la figura 39, la cual muestra curvas muy interesantes. Debido a los resultados obtenidos en las simulaciones y

con el fin de obtener una mayor información sobre el comportamiento del CDV en este caso, se agregaron dos tamaños de marcos TDMA, correspondientes a 2 y 5 ms. Esto debido a que la tendencia al aumento de la variación del retardo sólo se presenta en marcos TDMA de tamaños de 1 ms o menores. Sin embargo, a partir del marco de 2 ms se nota inicialmente una ligera disminución entre intensidades de tráfico de 0.1 y 0.2 Erlangs, la cual tiende a hacerse más notoria conforme aumenta el tamaño del marco.

Para 100 ms puede observarse como la CDV incluso sobrepasa los 3 ms para 0.1 Erlang y a medida que aumenta la intensidad tiende a estabilizarse. A partir de los 0.8 Erlang las diferencias entre las curvas para cada tamaño de marco son muy pequeñas.

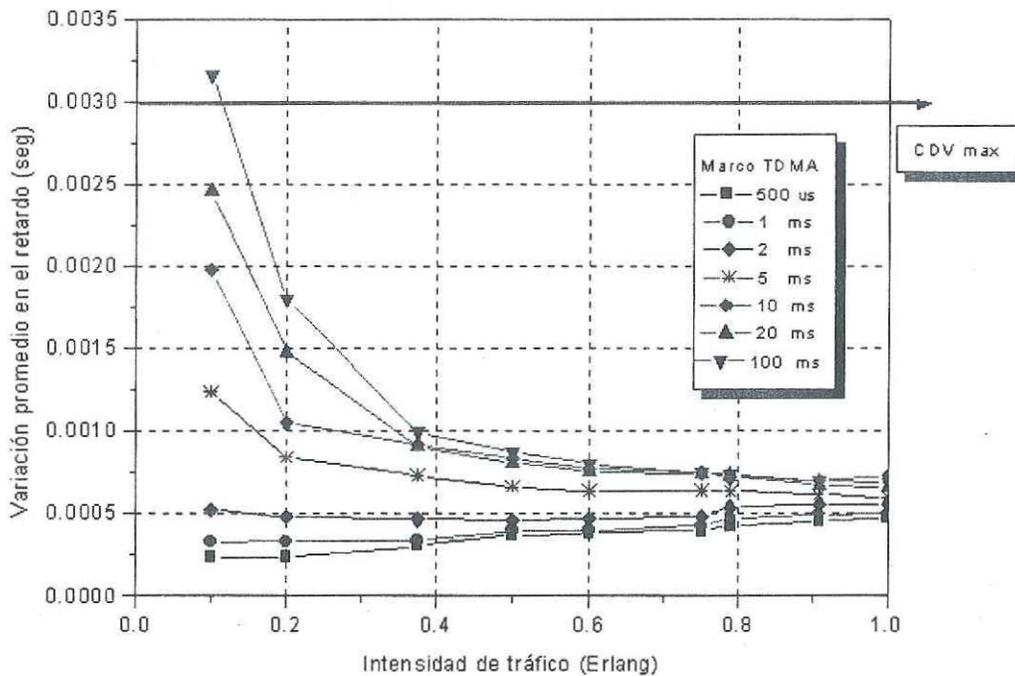


Figura 39. Variación promedio en el retardo con diferentes tamaños de marco TDMA

Este cambio, es decir una disminución inicial del CDV se presenta a partir de los 2 ms. En la figura 40 se muestran sólo las curvas correspondientes a 500 μ s, 1, 2 y 5 ms ya que son las curvas en las que puede notarse como comienza a darse este cambio. Para 10, 20 y 100 ms, el valor inicial del CDV es cada vez mas alto pero finalmente a intensidades altas todas las curvas terminan en valores menores a 1 ms.

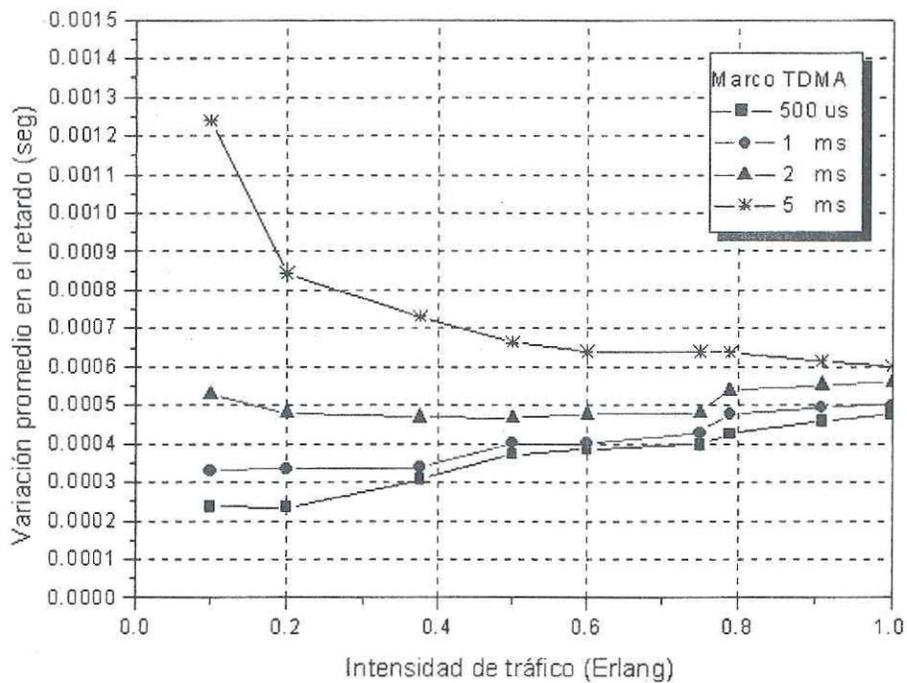


Figura 40. Variación promedio en el retardo tamaños de marco TDMA menores de 10 ms

Durante las simulaciones pudo observarse como el buffer no alcanzaba su capacidad máxima a intensidades bajas para los casos de tamaños de marcos de más de 5 ms. Esto debido a que las celdas ATM se están generando a 64 kbps, es decir, 1 celda cada 5 ms, mientras que los marcos de SDH se generan cada 125 μ s. Con una intensidad de tráfico

baja serán pocas las celdas que se generen simultáneamente. En el modelo de simulación no se transmiten marcos SDH a menos que haya celdas que enviar, lo cual provoca que para intensidades de tráfico bajas se generen menos marcos SDH. Para tamaños de marco TDMA de 1 ms o menos esto no resulta significativo, debido a que el buffer de la estación terrena no pasa de 6 marcos SDH y en tal caso el buffer si alcanza su capacidad máxima rápidamente. El incremento en la variación del retardo se debe entonces únicamente al crecimiento del buffer del conmutador ATM.

Para marcos mayores de 2 ms el hecho de que el buffer de la estación terrena no llegue a su capacidad máxima sí provoca diferencias significativas, y conforme el buffer incrementa su tamaño esta diferencia es más notoria. Es posible inferir que todas las curvas tienden a los mismos valores ya que básicamente dependen del tamaño del buffer del conmutador y la pequeña diferencia existente entre ellas es debida al retardo provocado por el tiempo de espera inducido por TDMA.

Finalmente, como se menciona en la sección VI.1, en este escenario se incluye en cada conmutador ATM la capacidad de desechar aquellas celdas que sobrepasen el CTD máximo. Esto con el fin de detectar en realidad cuantas celdas alcanzan este retardo máximo, ya que como puede observarse en las figuras 36 y 37, correspondientes a los retardos promedio y máximo, las diferencias son significativas.

La figura 41 muestra los resultados obtenidos en cuanto a la relación de celdas perdidas para 210 fuentes conforme aumenta el tamaño del marco TDMA. Esta relación se obtiene de acuerdo a la definición dada en el capítulo III de CLR, es decir mediante (8):

$$CLR = \frac{\text{Número de celdas perdidas}}{\text{Número de celdas enviadas}} \quad (8)$$

En este caso, por celdas perdidas se consideran sólo aquellas que han sido desechadas por el conmutador por exceder los 400 ms de CTD y los 3 ms de CDV, aclarando que no se analizan pérdidas que puedan presentarse por otras causas. Como ya se ha mencionado, el valor CLR establecido para el servicio CBR es de 3×10^{-7} máximo.

En la figura 41 puede verse como una vez que se comienza a tener pérdidas éstas exceden el valor de CLR máximo, aumentando de manera obvia conforme aumenta el tamaño del marco TDMA así como la intensidad de tráfico, ya que al exceder el límite del buffer del conmutador ATM el retardo sobrepasa los 400 ms y aumenta el número de celdas que son desechadas.

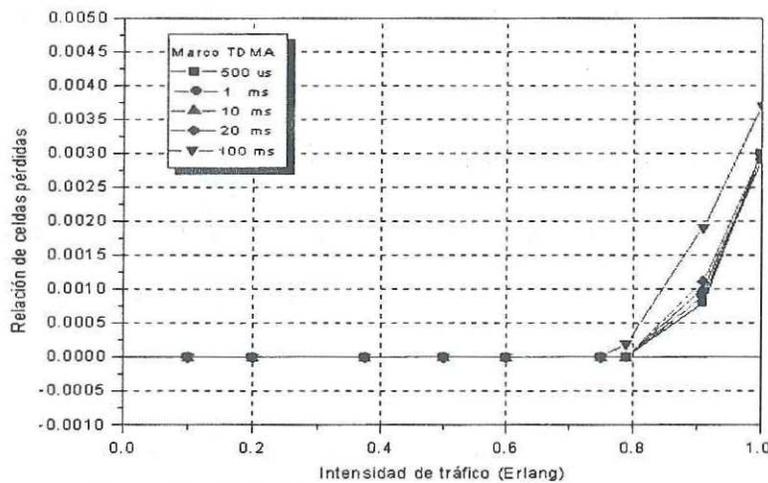


Figura 41. Relación de celdas perdidas con 210 fuentes

crecimiento del buffer de la estación terrena. Esto permite concluir que para este caso, la ranura óptima resulta de 1 ms, ya que la capacidad del buffer requerido en la estación terrena puede considerarse pequeña, los retardos se mantienen en los límites y la variación del retardo tiene un comportamiento estable. Podría considerarse también la utilización de un marco de menor tamaño como el caso de 500 μ s, sin embargo la variación en el retardo es más estable para 1 ms.

Es necesario señalar que los resultados obtenidos son para el caso de tener 210 fuentes en cada conmutador ATM por estación terrena. La utilización de una ranura de este tamaño seguirá siendo conveniente para casos en que se tengan menos fuentes sin embargo, no se considera que el sistema opere de manera adecuada con un número mayor de fuentes.

Por otra parte, estos resultados son válidos para 4 estaciones terrenas únicamente, aunque en base a los resultados obtenidos podría pensarse en una red más grande. El ancho de banda del canal podría ser compartido por más estaciones, pero para ello tendría que considerarse la utilización de un módulo sub-STM-1 menor de 13 Mbps. Pensando que el marco SDH de menor tamaño que pudiera transmitirse sería uno con capacidad para transportar una sola celda ATM, podría pensarse en un módulo sub-STM-1 de 6.144 Mbps, formado por 3 VC-12. Para tal caso el canal podría ser compartido por 8 estaciones terrenas, el marco TDMA podría seguir siendo de 1 ms, sólo que cada estación tendría solo 125 μ s para transmitir su información, como sucede para 4 estaciones con un marco de 500 μ s. Como puede observarse en las gráficas presentadas en esta sección, esto no tendría impacto negativo en los parámetros de calidad analizados en este trabajo.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 CONCLUSIONES

La interconexión de redes ATM por medio de enlaces satelitales representa una opción para implementar redes de cobertura amplia con capacidad de banda ancha, correspondiendo estas características de manera independiente a la tecnología satelital y la tecnología ATM. La integración de estas tecnologías, sin embargo, no es sencilla, ya que ATM fue diseñada para operar sobre enlaces terrestres de fibra óptica con retardos y tasas de errores muy pequeñas, características que no tiene un enlace satelital.

En este trabajo se llevó al cabo una investigación acerca de las consideraciones que deben tomarse para llevar al cabo la interconexión de redes ATM antes mencionada. Los elementos y las tecnologías involucradas son muchas, incluyendo componentes tanto del segmento terrestre como del segmento espacial.

En base a las investigaciones realizadas se decidió implementar un modelo de simulación utilizando la herramienta de simulación OPNET. Las principales características del sistema diseñado son: Operación en banda de frecuencia Ka (30/20 GHz), técnica de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y la jerarquía digital síncrona (SDH) para el transporte de celdas. El tráfico analizado consiste en llamadas de voz de tasa continua de bit tipo CBR a 64 kbps. La evaluación del sistema se llevó al cabo en base a los parámetros

de calidad de servicio establecidos para la categoría CBR, específicamente el retardo en la transferencia de celdas (CTD) y la variación en el retardo de celdas (CDV).

El modelo se evaluó en tres escenarios, los escenarios uno y dos corresponden a enlaces punto a punto a 52 y 13 Mbps, respectivamente. El tercer escenario se compone de cuatro redes ATM compartiendo el enlace satelital mediante TDMA.

Los primeros dos escenarios permitieron definir la cantidad de fuentes generadoras de llamadas soportadas por los enlaces, así como la intensidad de tráfico a la que pueden operar sin exceder los parámetros de QoS. Para el primer caso, correspondiente al enlace de 52 Mbps, el sistema opera de manera adecuada con 660 fuentes a intensidades menores de 0.8 Erlangs, o mayores en caso de tener menos fuentes. Para el segundo caso, es conveniente utilizar un máximo de 210 fuentes a intensidades menores de 0.8 Erlangs, o menor cantidad de fuentes para mayores intensidades de tráfico.

Las simulaciones realizadas en el tercer escenario, llevadas al cabo con 210 fuentes, permitieron definir que el tamaño adecuado de marco TDMA para el sistema es de 1 ms, ya que presenta una eficiencia adecuada, no provoca grandes aumentos en el retardo de transferencia y la variación en el retardo permanece casi estable conforme se incrementa la intensidad de tráfico. Esto no sucede con marcos TDMA de mayor tamaño, sobretodo de más de 2 ms, ya que se observó que en esos casos, a intensidades bajas de tráfico se incrementa significativamente la variación en el retardo. El análisis realizado permite

VII.2 APORTACIONES

Las aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Se realizó una investigación de las tecnologías involucradas para implementar la interconexión de redes ATM por satélite. En este documento se presentan las características básicas de estas tecnologías que comprenden tanto el segmento espacial como el segmento terrestre de la interconexión mencionada.
- Se implementó un nuevo modelo de simulación en OPNET para llevar al cabo la interconexión de redes ATM por satélite, el cual puede ser utilizado como base para investigaciones futuras relacionadas con este tema.
- Las simulaciones realizadas permitieron establecer las dimensiones adecuadas del sistema implementado en cuanto a número de fuentes de voz, intensidad de tráfico, capacidad del buffer del conmutador, tamaño de marco TDMA y número máximo de estaciones terrenas, de manera que se cumpla con los parámetros de Calidad de Servicio establecidos por la ITU para el servicio CBR.
- Se logró definir tamaños específicos de dimensión de memoria temporal (buffers) para distintos escenarios de tráfico así como de número de fuentes. Se determinó que el mayor efecto de retardo por almacenamiento en un enlace ATM por satélite es debido a la intensidad de tráfico más que al número de fuentes.
- Se determinó que la variación en el retardo no depende en sí del enlace satelital, si no del tamaño del buffer del conmutador ATM, así como de la utilización de SDH como método de transporte de celdas y TDMA como técnica de acceso al satélite.

VII. 3 TRABAJOS FUTUROS

En base a los resultados obtenidos y con la finalidad de continuar el trabajo presentado se recomienda llevar al cabo lo siguiente:

- Realizar el análisis y simulaciones utilizando diferentes tipos de tráfico en el enlace (voz, video y datos), ya que ATM permite la integración de tráfico multimedia.
- Analizar en detalle los efectos del canal satelital en la capa física sobre los parámetros de calidad de servicio. Se recomienda estudiar los efectos relacionados con interferencias, atenuaciones, sobre todo en banda Ka.
- ATM no es la única tecnología de banda ancha, ya que IP es un protocolo que permite también la integración de tráfico multimedia. La transmisión de IP sobre ATM es una opción que está siendo utilizada actualmente, así que se recomienda analizar la calidad de servicio en el transporte de tráfico tipo CBR sobre IP en el caso de enlaces satelitales.
- Se considera conveniente evaluar otros métodos de transporte de celdas, diferentes a SDH, así como la utilización de satélites con procesamiento a bordo, lo que hace posible la transmisión de celdas ATM por el canal satelital.

REFERENCIAS

- Akyildiz Ian y Jeong Seong-Ho, 1997. "Satellite ATM Networks: A Survey". IEEE Communications Magazine. 35 (7). 30-43 p.
- Becerra Ernesto, 1996. "Transmisión de SDH vía sistema de satélites SOLIDARIDAD para comunicaciones de multimedios". Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, Ensenada, B.C.
- Chitre D.M., Gokhale S., Lunsford J.L., Mathews N., 1994. "Asynchronous Transfer Mode (ATM) operation via satellite: Issues, challenges and resolutions". International Journal of Satellite Communications. (12). 211-222 p.
- Conte Roberto, 2000. "Satellite Rural Telephone Network Design: A Methodology for Performance Optimization". Tesis de Doctorado en Filosofía en Ingeniería eléctrica y computación, Instituto Politécnico de Virginia, Blacksburg, Virginia.
- Cuevas Enrique, 1999. "The development of performance and availability standards for satellite ATM networks". IEEE Communications Magazine. 37 (7): 74 -79 p.
- Dhadesugoor R, 1990. "Performance analysis of a multiple transmission protocol for VSAT networks". International Journal of Satellite Communications. (8). 307-312 p.
- DuBose Kent, 1991. "An effective bit rate table lookup based admission control strategy for the ATM B-ISDN". MSc Degree Thesis, Carnegie Mellon University.
- Feher Kamilo, 1981. "Digital Communications. Satellite/ Earth station engineering". Prentice- Hall International, Englewood Cliffs. 469 pp.
- Félix Héctor, 1998. "Estudio del canal en el transporte de información utilizando SDH vía satélite Solidaridad". Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, Ensenada, B.C.
- Filip Miodrag y Vilar Enric, 1990. "Optimum utilization of the channel capacity of a satellite link in the presence of amplitude scintillations and rain attenuation". IEEE Transactions on Communications. 38 (11). 1958-1965 p.
- Foro ATM, 1999. "Traffic Management Specification, version 4.1".
- Gi Lee Byeong, 1993. "Broadband telecommunications technology". Artech House, inc. 560 pp.
- Goyal Rohit, Kota Sastri, Jain Ra, Fahmy Sonia, Vandalore Bobby, Kallaus Jerry, 2000. "Analysis and Simulation of Delay and Buffer Requirements of Satellite-ATM Networks for TCP/IP Traffic". www.cis.ohio-state.edu.

Hadjitheodosiuo M, Spyros L., Liveris Angel D., 1999. "Broadband access via satellite". Computer Networks. 31 (4).

Horak Ray, 2000. "Communications Systems & Networks". The M&T Networking Technology Series. IDG Books Worldwide Inc. Segunda edición. 695 pp.

Hu Yurong y Li Victor, 2001. "Satellite- Based Internet: A Tutorial". IEEE Communications Magazine. 39 (3). 154-162 p.

ITU-T, 1996. Recomendación G.861 "Principios y directrices para la integración de sistemas de satélite y de radioenlaces en las redes de transporte con jerarquía digital síncrona". Geneva

ITU-T, 2000. Recommendation I.356. "B- ISDN ATM Layer Cell Transfer Performance". Geneva.

Ivanic D. William, Brooks David, Frantz Brian, Hoder Doug, Shell Dan, Beering David, 1999. "NASA's Broadband satellite networking research". IEEE Communications Magazine. 37 (7) : 40-47 p.

Jamalipour Abbas, 2001. "Broad-Band Satellite Networks – The Global IT Bridge". Proceedings of the IEEE. 89 (1): 88-104 p.

Lenhard Peter, 1995. "Asynchronous Transfer Mode, Technical Review". Prentice Hall. Segunda edición.

Maral G., 1995. "VSAT Networks". John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, Inglaterra.

Mohamed-Slim Alouini, Borgsmiller Scott, Steffes Paul G., 1997. "Channel Characterization and Modeling for Ka-Band Very Small Aperture Terminal". Proceedings of the IEEE. 85 (6): 981-997.

Peterson Larry y Davie Bruce, 1996. "Computer Networks, A systems approach". Morgan Kaufmann Publishers, Inc. 550 pp.

Peyravi Hassan, 1999. "Medium access control protocols performance in satellite communications". IEEE Communications Magazine. 37 (3): 62-71 p.

Pratt Timothy y Bostian Charles, 1986. "Satellite Communications". Wiley. & Sons, Inc. 472 pp.

Rappaport, 1996. "Wireless communications. Principles & Practice". Prentice Hall. New Jersey. 633 pp.

Rogers David V., Ippolito Louis J., Davarian Faramaz, 1997. "System Requirements for Ka-Band Earth-Satellite Propagation Data". Proceedings of the IEEE. 85 (6). 810-820 p.

Spilker James, 1977. "Digital Communications by Satellite". Prentice-Hall, INC. Primera edición. Englewood Cliffs, New Jersey. 665 pp.

Strange A., Arambepola S.L., Flavin A.J., Stevenson A., 1994. "Carriage of SDH over satellite systems". International Journal of Satellite Communications. 12. 239-247 p.

Sweitzer John, 1999. "The VSAT ka-band configuration". Satellite Communications. 23 (10): 43-48 p.

Tanenbaum S. Andrew, 1997. "Computer Networks". Prentice-Hall. Tercera edición. 795 pp.

Tomasi Wayne, 1996. "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas". Prentice-Hall. Segunda edición. México, D.F. 843 pp.

ACRÓNIMOS

AAL	<i>(ATM Adaptation Layer)</i>	Capa de adaptación ATM
ABR	<i>(Available Bit Rate).</i>	Tasa de datos Disponible
ADPCM	<i>(Adaptive Diferencial PCM)</i>	Modulación PCM diferencial adaptiva
ANSI	<i>(American National Standards Institute)</i>	Instituto Americano de Normalización
ATM	<i>(Asynchronous Transfer Mode)</i>	Modo de transferencia asíncrono
BPSK	<i>(Biphase PSK)</i>	Modulación binaria de fase
C/N		Relación portadora - ruido
CBR	<i>(Constant Bit Rate).</i>	Tasa Constante de Bit
CDMA	<i>(Code division multiple access)</i>	Acceso múltiple por división de código
CDV	<i>(Cell delay variation).</i>	Variación de retardo de celdas
CDVT	<i>(Cell Delay Variation Tolerance)</i>	Variación del retardo de celdas
CER	<i>(Cell error ratio).</i>	Relación de celdas erróneas
CLP	<i>(Cell Loss Priority).</i>	Prioridad de pérdida de celda
CLR	<i>(Cell loss ratio).</i>	Relación de celdas pérdidas
CMR	<i>(Cell misinsertion rate)</i>	Tasa de celdas mal insertadas
CTD	<i>(Cell transfer delay).</i>	Retardo en la transferencia de celdas
FDMA	<i>(Frequency- division multiple access)</i>	Acceso múltiple por división de frecuencia
FIFO	<i>(First In – First Out)</i>	Primera llegada – Primera salida
GEO	<i>(Geostationary Earth Orbit)</i>	Órbita Geoestacionaria
GFC	<i>(Generic Flow Control)</i>	Control de flujo Genérico
GFR	<i>(Guaranteed Frame Rate).</i>	Tasa de Marco Garantizada
GII	<i>(Global Information Infrastructure)</i>	Infraestructura de información global
HEC	<i>(Header Error Control).</i>	Control de Error en el Encabezado
IDU	<i>(Indoor unit)</i>	Unidad interna
ITU	<i>(International Telecommunications Union)</i>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LEO	<i>(Low earth orbit)</i>	Órbita baja
MBS	<i>(Maximum Burst Size)</i>	Tamaño máximo de ráfaga
MCR	<i>(Minimum Cell Rate)</i>	Tasa mínima de celdas
MEO	<i>(Medium Earth Orbit)</i>	Órbita media
nrt-VBR	<i>(non real-time Variable Bit Rate).</i>	Tasa Variable de Bit no en tiempo real
ODU	<i>(Outdoor unit)</i>	Unidad externa
PCM	<i>(Pulse Code Modulation)</i>	Modulación de pulsos codificados
PCR	<i>(Peak Cell Rate)</i>	Tasa de celdas pico
POH	<i>(Path OverHead)</i>	Encabezado de trayectoria
PSK	<i>(Phase shift keying)</i>	Modulación de fase
PTI	<i>(Payload Type Identifier).</i>	Identificador de tipo de carga útil
QoS	<i>(Quality of Service)</i>	Calidad de servicio
QPSK	<i>(Quadriphase PSK)</i>	Modulación de fase de cuatro estados

RM-cells	<i>(Resource Management Cells)</i>	Recurso de administración de celdas
rt-VBR	<i>(real-time Variable Bit Rate).</i>	Tasa Variable de Bit en tiempo real
SAR	<i>(Synthetic Aperture Radar)</i>	Radar de apertura sintética
SCR	<i>(Sustained Cell Rate)</i>	Tasa de Celdas Sostenida
SDH	<i>(Synchronuos Digital Herarchy)</i>	Jerarquía digital síncrona
SECBR	<i>(Severely errored cell block ratio).</i>	Relación de bloques de celdas severamente dañados
SOH	<i>(Section OverHead)</i>	Encabezado de sección
SONET	<i>Synchronous Optical NETwork)</i>	Red óptica síncrona
TCP/IP	<i>(Transmission Control Protocol/ Internet Protocol)</i>	Protocolo de control de transmisión/ Protocolo de Internet
TDMA	<i>(Time division multiple access)</i>	Acceso múltiple por división de tiempo
TU	<i>(Tributary Unit)</i>	Unidad tributaria
UBR	<i>(Unspecified Bit Rate).</i>	Tasa de bit no especificada
VC	<i>(Virtual Container)</i>	Contenedor Virtual
VCI	<i>(Virtual Channel Identifier)</i>	Identificador de canal virtual
VPI	<i>(Virtual Path Identifier).</i>	Identificador de ruta virtual
SAM	<i>(Simple Atenuation Model)</i>	Modelo de atenuación simple
VSAT	<i>(Very small aperture unit)</i>	Terminal de muy pequeña apertura

APÉNDICE A

CÁLCULO DE ENLACE EN BANDA Ka

En el diseño de un sistema de comunicaciones por satélite el realizar un cálculo de enlace es el método de considerar los factores determinantes para lograr un buen desempeño tanto del enlace ascendente como en el descendente. Los principales factores son:

- Ganancia de la antena.

La cual es una medida de la direccionabilidad de la antena o de su potencia para concentrar energía en una dirección determinada. Es directamente proporcional a su área de apertura y al cuadrado de la frecuencia de transmisión.

- PIRE (Potencia isotrópica efectiva radiada).

Se obtiene multiplicando la potencia de transmisión por la ganancia de la antena. La magnitud como la distribución del PIRE del satélite sobre su área de cobertura son los principales determinantes del diseño de la estación terrena.

- Temperatura de ruido.

Es una medida del ruido térmico de los dispositivos activos y pasivos en el sistema receptor.

- Pérdidas por propagación.

No son pérdidas en el sentido de potencia absorbida, sino que se refiere a la dispersión de la energía conforme una onda electromagnética viaja desde la fuente de transmisión. Se obtienen mediante:

$$20 \log (4\pi Rf)/c \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

Donde:

R: Distancia (mtrs)

c: 2.99×10^8 m/s (velocidad de la luz)

f: Frecuencia de transmisión (Hz)

- Otras pérdidas.

Estas pérdidas están relacionadas principalmente con los ajustes en las antenas.

A.1 EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN BANDA Ka

Los efectos de la atmósfera en los enlaces de satélites de comunicaciones son un aspecto muy importante en el diseño y desempeño de los sistemas de comunicación espaciales. Estos problemas resultan más graves en los sistemas operando a bandas mayores de 10 GHz.

Los principales factores que afectan los enlaces satelitales en banda Ka incluyen: Atenuación por gases; atenuación causada por hidrometeoros (lluvia, nubes, nieve, etc); depolarización, la cual también es principalmente causada por hidrometeoros; incremento en la tasa de ruido y variaciones rápidas de la señal, conocidas como centilleo, causadas por fluctuaciones en el índice de refracción en la troposfera.

1. Atenuación por gases.

En una frecuencia fija la atenuación por gases depende principalmente de la concentración de vapor de agua y del ángulo de elevación. La absorción por gas (L_g , en dB) se incluye en el presupuesto de potencia como una constante en base a las características de la atmósfera determinadas. Por ejemplo, para una presión de superficie de 1 atm, una temperatura de superficie de 20°C y una concentración de vapor de agua de 10 g/m³, se tiene una L_g de 0.41 dB para el enlace descendente.

2. Atenuación por lluvia

La lluvia es uno de los factores que más afecta un enlace satelital en banda Ka, ya que no sólo provoca atenuación de la señal, sino que también incrementa la temperatura de ruido en la antena receptora, por lo que el enlace descendente es el que resulta más afectado.

Los dos métodos más ampliamente utilizados para el modelado de la atenuación por lluvia son el Modelo de Atenuación Simple (SAM, Simple Attenuation Model), desarrollado por la NASA y el método de la ITU-R [Mohamed, 1997], en los cuales las pérdidas por lluvia, (L_r en dB) pueden ser estimadas mediante:

$$L_r = aR^b L \quad (8)$$

Donde:

aR^b : Atenuación específica (dB/Km). R es la tasa de lluvia específica por región (mm/h) y los valores de a y b dependen de la frecuencia de transmisión de la siguiente manera [Pratt y Bostian, 1986]:

$$a = \begin{cases} 4.21 \times 10^{-5} f^{2.42} & 2.9 \leq f \leq 5.4 \text{ GHz} \\ 4.09 \times 10^{-2} f^{0.699} & 5.4 \leq f \leq 180 \text{ GHz} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1.41 f^{-0.0779} & 8.5 \leq f \leq 25 \text{ GHz} \\ 2.63 f^{-0.272} & 25 \leq f \leq 164 \text{ GHz} \end{cases}$$

L : Es la ruta efectiva a través de la lluvia (Km) determinada mediante el método de SAM por:

$$L = (H_e - H_o) / \sin(E_l) \quad (9)$$

Donde:

H_e : Altura de la tormenta (es decir, de las nubes sobre el nivel del mar) (Km).

H_o : Elevación de la estación terrena sobre el nivel del mar (Km).

E_l : Ángulo de elevación de la antena.

La temperatura de ruido de la antena receptora T_{ant} está relacionada a la temperatura de ruido del cielo de manera que:

$$T_{ant} = T_{cielo} + T_{otros} \quad (10)$$

Donde T_{otros} incluye ruido :

- 1) Inherente a la construcción de la antena y como resultado de las pérdidas internas.
- 2) Radiado por la tierra en las vecindades de la VSAT y capturado por los lóbulos laterales de la antena.
- 3) Generado por cualquier fuente fabricada por el hombre tales como transformadores.

La temperatura de ruido del cielo (T_{cielo}) varía dependiendo de las condiciones climatológicas. En el caso del cielo despejado esta temperatura se toma como una constante y depende de la atenuación por gas, la temperatura física de la atmósfera, T_{atm} (entre 270 y 290 K) y del ruido cósmico de fondo, T_{cb} (usualmente tomado como 2.7 K), de la siguiente manera:

$$T_{\text{cielo}} = \frac{T_{\text{cb}}}{l_g} + T_{\text{atm}} \left(1 - \frac{1}{l_g}\right) \quad (11)$$

Donde l_g corresponde al valor numérico de L_g (Atenuación por gases).

La lluvia actúa como una fuente adicional de ruido en el enlace descendente y está relacionada a la atenuación por gases mediante:

$$T_{\text{lluvia}} = \frac{T_{\text{cb}}}{l_{g,d} l_{r,d}} + T_{\text{atm}} \left(1 - \frac{1}{l_{g,d} l_{r,d}}\right) \quad (12)$$

El valor $L_{g,d}$ corresponde a l_g en el enlace descendente y $l_{r,d}$ es el valor numérico de la atenuación por lluvia en el enlace descendente.

Considerando una Temperatura de ruido cósmico de 2.7 K y una temperatura atmosférica de 280 K, la temperatura del cielo en condiciones de lluvia está dada por:

$$T_{\text{lluvia}} = 280 - \frac{277.3}{l_{g,d} l_{r,d}} \quad (13)$$

3 Atenuación por Centilleo

Después de la lluvia, el centilleo (scintillation) es otro de los fenómenos que más afectan el rendimiento de los sistemas satelitales en banda Ka. Se presenta como fluctuaciones, las cuales son el resultado de variaciones aleatorias temporales así como cambios en el índice de refracción a lo largo de la ruta de propagación. Los efectos del centilleo son más pronunciados conforme aumenta la frecuencia de transmisión y pueden resultar el efecto de degradación predominante en sistemas VSAT en banda Ka operando con bajos ángulos de elevación en regiones secas.

Al contrario que el caso de la atenuación por lluvia o por gases, los cuales provocan procesos de absorción, el centilleo no es un proceso de pérdidas, así mismo no tiene efectos en la temperatura de ruido de la antena y resulta independiente de la polarización.

Es posible caracterizar la amplitud del centilleo utilizando la aproximación de Rytov y la formulación teórica de Tatarskii [Mohamed et al, 1997] mediante el proceso estocástico $\chi(t)$ definido por:

$$\chi(t) = \ln (E(t)/E_0) \text{ (Nepers)} \quad (14)$$

Donde :

$E(t)$: Amplitud instantánea de la señal recibida.

E_0 : Nivel medio de la señal en cielo despejado.

A su vez la atenuación por centilleo en una escala de decibeles está dada por [Filip y Vilar, 1990]:

$$L\chi = 20 \log_{10} (E(t)/E_0) = 20 \log_{10} (e^{\chi}) = 8.686\chi \quad (15)$$

Es posible relacionar C/N_d con la atenuación por lluvia mediante:

$$C/N_{d, lluvia} = \frac{C/N_d}{d_{r,d}} \quad (20)$$

Donde:

$$d_{r,d} = (1 + \beta)l_{r,d} - \beta \quad (21)$$

y

$$\beta = \frac{(T_{atm} - T_{cb})}{(T_{atm} + T_{otros} + T_{rcp})l_{g,d} - (T_{atm} - T_{cb})} \quad (22)$$

El efecto combinado de la atenuación por lluvia y por centilleo, en decibeles, está dado por:

$$C/N_{i, combinado(dB)} = C/N_{i(dB)} - (D_{r,i} - L_{\chi i}) \quad (23)$$

$D_{r,i} = 10\log_{10}(d_{r,d})$ para el enlace descendente y es igual a L_r calculada por (8) para el enlace ascendente.

Con $i = u$ (uplink o enlace ascendente) o d (downlink o enlace descendente) según el enlace correspondiente.

