

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE UNA
EMPRESA DE TPBC PARA LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE
VIDEO BAJO DEMANDA (VoD)**

ANGELA VIVIANA PEÑA PUERTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE UNA
EMPRESA DE TPBC PARA LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE
VIDEO BAJO DEMANDA (VoD)**

ANGELA VIVIANA PEÑA PUERTO

Monografía para optar al título de
Especialista en Telecomunicaciones

Director

RAMIRO PLAZAS TARAZONA

Magíster Ingeniero Electrónico
Especialista en Telecomunicaciones

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2004

CONTENIDO

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xiii
OBJETIVOS.....	xv
METODOLOGÍA.....	xvi
1. VIDEO BAJO DEMANDA	1
1.1 TIPOS DE VÍDEO BAJO DEMANDA (VOD)	2
1.2 FORMATO DE COMPRESIÓN MPEG.....	4
1.2.1 Compresión de vídeo.....	6
1.2.1 Compresión de audio.....	10
2. ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DE VoD.....	13
2.1 PROVEEDOR DE SERVICIO.....	14
2.1.1 Servidores de vídeo.....	15
2.1.1.1 Esquema de almacenamiento jerárquico.....	16
2.1.1.2 Subsistema de almacenamiento.....	17
2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	19
2.2.1 Red de transporte.....	19
2.2.1.1 Parámetros de calidad de servicio (QoS)	21

2.2.1.2	Categorías de servicio ATM.....	24
2.2.1.3	Capa de adaptación ATM.....	26
2.2.2	Red de acceso.....	28
2.2.2.1	Tecnologías de acceso.....	29
2.2.2.2	Embotellamiento en la red de acceso.....	32
2.2.2.3	Sistemas de acceso de ADSL.....	34
2.3	SISTEMA CLIENTE FINAL.....	35
2.3.1	Caja de control (STB: <i>Set-Top Box</i>).....	36
2.3.2	Dispositivo visualizador.....	38
3.	MODELO DE REDES DE CONMUTACIÓN DE PAQUETES.....	40
3.1	PARÁMETROS DE MODELACIÓN.....	41
3.2	PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN	45
3.3	TOPOLOGÍAS DE RED QUE FAVORECEN RETARDOS BAJOS.....	46
3.3.1	Número de saltos promedio bajo.....	47
3.3.2	Número de enlaces bajo.....	47
4.	RESULTADOS DEL DISEÑO.....	50
5.	CONCLUSIONES.....	68
	BIBLIOGRAFÍA.....	70
	ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Topología de la red.....	xiii
Figura 2. Diagrama para la determinación del tráfico.....	xv
Figura 3. Diagrama para el cálculo de las capacidades y los retardos.....	xvii
Figura 4. Esquema básico de un sistema de VoD.....	13
Figura 5. Arquitectura del hardware de un servidor de vídeo típico.....	19
Figura 6. Arquitectura de servidores cache.....	34
Figura 7. Arquitectura de hardware de un <i>Set-Top Box</i> sencillo.....	39
Figura 8 . Estructura de red en malla.....	47
Figura 9. Estructura de red en anillo.....	48
Figura 10. Estructura de red en estrella.....	48
Figura 11. Distribución de rutas y servidores.....	55
Figura 12. Algoritmo para calcular el número de STM-N.....	61
Figura 13. Algoritmo simplificado para calcular el número de STM-N.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Abonados potenciales.....	50
Tabla 2. Clientes potenciales.....	51
Tabla 3. Ubicación de servidores.....	52
Tabla 4. Usuarios por ruta de acceso.....	54
Tabla 5. Matriz de tráfico que ingresa a la red.....	57
Tabla 6. Matriz de tráfico por enlace.....	59
Tabla 7. Capacidad y retardo para cada enlace.....	65
Tabla 8. Longitud de la cola en cada enlace.....	67

LISTA DE ANEXOS

Anexo A: Acrónimos.....	74
Anexo B: Raíz cuadrada de la matriz de tráfico por enlace.....	76
Anexo C: Mapa conceptual sobre el artículo: Transmisión robusta de señales de vídeo sobre redes de banda ancha.....	77
Anexo D: Mapa conceptual: Análisis de Tráfico.....	78

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE UNA EMPRESA DE TPBC PARA LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE VIDEO BAJO DEMANDA (VoD)*

AUTOR: ANGELA VIVIANA PEÑA PUERTO**

PALABRAS CLAVES: Servicios interactivos de video, Formatos de video y audio, MPEG sobre ATM, Servidores de video, Categorías de servicio, Capas de adaptación ATM

DESCRIPCIÓN: El desarrollo de este trabajo se concentra en la cuestión de cómo se deben administrar los recursos disponibles de una red de distribución de una empresa de Telefonía Pública Básica Conmutada (TPBC) para que soporte los servicios de video bajo demanda (VoD). Se precisan como criterios de desempeño de la red: la capacidad y el retardo, por lo cual se determina la capacidad óptima

* Trabajo de grado

** Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Especialización en Telecomunicaciones
Director: Msc. Ramiro Plazas Tarazona

para cada uno de los enlaces de la red que garanticen un retardo mínimo de la señal de vídeo, de manera que la empresa TPBC pueda ofrecer los servicios de VoD con calidad.

La metodología seguida parte de la necesidad de evaluar si la red es adecuada para la prestación de VoD. A continuación se define los parámetros de la red: tanto los que se conocen como los que se deben determinar y/u optimizar. Definidos estos parámetros se procede a realizar un análisis y diseño del tráfico de la red que podría generar el servicio de VoD de acuerdo al número de usuarios que adquirirían el servicio. Para resolver los cálculos que genera el diseño se usa una hoja de cálculo muy conocida: Excel.

Durante el análisis del tráfico surgió la necesidad de limitar la capacidad total de la red a fin de evitar que el enlace obligatorio para la mayoría de las rutas, se saturara. En consecuencia se hizo necesario limitar el número de usuarios de diseño, lo cual se puede apreciar mediante el factor de utilización, que resultó ser muy bajo. Una implicación inmediata de lo anterior, es que se tendría que elevar el costo del servicio, pues con la cantidad de usuarios que se atenderían no sería suficiente para cubrir las inversiones que implican el mejoramiento de la infraestructura, por ejemplo la adquisición de los servidores de vídeo. Para hacer más rentable el servicio de VoD se sugiere cambiar la topología de la red a una topología en anillo. De ésta manera se reduciría el número de enlaces favoreciendo así el incremento de la capacidad no sólo en el enlace obligatorio sino también en los otros enlaces.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS AND DESIGN OF THE NETWORK OF DISTRIBUTION OF PUBLIC SWITCHING TELEPHONE NETWORK TO SUPPORT THE SERVICES OF VIDEO ON DEMAND (VoD) *

AUTHOR: PEÑA PUERTO ANGELA VIVIANA **

KEY WORDS: Interactive multimedia, compressed digital video standards, MPEG over ATM, video server, categories of service

DESCRIPTION: The development of this work is concentrated in the question of how should the resources be managed which are available of a network of distribution of Public Switching Telephone Network (PSTN) to support the services of Video on Demand (VoD). They need like performance requirements of the network: capacity and delay, thus the optimal capacity for each one of the links of the

* Degree Project

** Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School.
Especialization of Telecommunications.
Director: Msc. Ramiro Plazas Tarazona

network is determined that guarantee a minimum delay of the video signal, so that PSTN can offer the services of VoD with quality.

The followed methodology part of the necessity to evaluate if the network is adapted for the benefit of VoD. Next defines the parameters of the network: as much those that are known like that they are due to determine y/u to optimize. Defined these parameters it is come to make an analysis and design of the traffic of the network that could generate the service of VoD according to the number of users who would acquire the service.

During the analysis of the traffic the necessity arose to limit the total capacity of the network in order to avoid that the obligatory link stops most of the routes, was saturated. Consequently it was made necessary to limit the number of design users, that cost would have to elevate of service, because with the amount of users who would be taken care of it would not be sufficient to cover the investments that imply the improvement of the infrastructure. In order to be in the service of VoD more profitable it is suggested to change the topology of the network to a ring topology. Of this one way it would also be reduced to the number of links favoring therefore the increase of the capacity not only in the obligatory link but in the other links.

INTRODUCCIÓN

La prestación de servicios de contenido multimedia ofrecidos en el entorno residencial, se ha convertido en un reto para las empresas de Telefonía Pública Básica Conmutada (TPBC), quienes tienen una infraestructura que hace que una gran cantidad de usuarios residenciales tengan acceso a líneas telefónicas. Por lo cual se busca que con la introducción de tecnologías digitales y nuevas redes de comunicaciones se puedan aprovechar estas líneas para la prestación de servicios multimedia tales como televisión digital y vídeo bajo demanda.

Conscientes de que los servicios multimedia que podrían prestar las empresas de televisión por cable constituyen una competencia, se deben enfocar los esfuerzos hacia la administración eficiente de los recursos disponibles de las empresas de TPBC, de manera que se pueda ofrecer, en primera instancia, el servicio de vídeo bajo demanda (VoD). El primer problema que surge es: definir los criterios de desempeño de la red para la prestación de este servicio con calidad.

Con el desarrollo de este trabajo se busca poner en práctica conceptos, procedimientos y herramientas aprendidas sobre el desempeño de redes, mediante el estudio de casos propuesto. Y no sólo esto, también se pretende apoyar

otro trabajo de investigación sobre los servicios de vídeo sobre redes de acceso ADSL que se encuentra en curso. La suposición que se espera comprobar a lo largo de esta monografía es que los recursos con que cuenta actualmente la empresa de TPBC en cuestión son apropiados para la prestación del servicio de vídeo bajo demanda.

La metodología seguida parte de la necesidad de evaluar si la red es adecuada para la prestación de VoD. A continuación se define los parámetros de la red: tanto los que se conocen como los que se deben determinar y/u optimizar. Definidos estos parámetros se procede a realizar un análisis y diseño del tráfico de la red que podría generar el servicio de VoD de acuerdo al número de usuarios que adquirirían el servicio. Para resolver los cálculos que genera el diseño se usa una hoja de cálculo muy conocida: Excel.

Este documento consta de cuatro partes fundamentales, las tres primeras corresponden a una revisión bibliográfica de los conceptos más importantes tenidos en cuenta en el desarrollo del trabajo, entre estos están: la definición de vídeo bajo demanda, los formatos de codificación de vídeo, la descripción de las partes que constituyen un sistema de VoD y el modelamiento de la red. En la cuarta parte se presentan los resultados obtenidos del estudio y el diseño de la red, en cuanto a capacidades y retardos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer cómo se deben administrar los recursos disponibles en una red de distribución de una empresa de Telefonía Pública Básica Conmutada para que soporte los servicios de video bajo demanda (VoD).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❑ Precisar los criterios de desempeño de la red de distribución que posibiliten que la empresa TPBC pueda ofrecer los servicios de video bajo demanda.

- ❑ Asignar la capacidad óptima a cada uno de los enlaces de la red de distribución de manera que se puedan aprovechar los recursos disponibles de la red.

METODOLOGÍA

La metodología usada en este trabajo señala la necesidad de definir y especificar la solución antes de comenzar a desarrollarla, se siguen los siguientes pasos:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ante la creciente demanda de usuarios para servicios multimedia tales como video bajo demanda, televisión digital y en general servicios de banda ancha, se debe evaluar si la red ATM/ADSL con la que dispone actualmente la empresa de Telefonía Pública Básica Conmutada (TPBC), puede soportar este tipo de servicios.

Para la determinación de si se podría ofrecer concretamente el servicio de video bajo demanda (VoD), se requiere estimar el cubrimiento, medido en la cantidad de usuarios que tendrían el servicio y la calidad, medida en los retardos de la señal de video.

DESCRIPCIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS

En el análisis que se pretende realizar se pueden definir como entradas, los datos

que se conocen para el sistema de distribución de la red, como:

- ❑ Tecnología del *backbone*: Modo de transferencia asíncrono (ATM: *Asynchronous Transfer Mode*), esta es la tecnología con la que cuenta actualmente la empresa de TPBC y que se considera apropiada para transportar voz, datos y vídeo.
- ❑ Tecnología en la red de acceso: Línea asimétrica digital de abonado (ADSL: *Asymmetric Digital Subscriber Line*), opción más evidente para un rápido despliegue de servicios multimedia sobre pares telefónicos.
- ❑ Formato de compresión de vídeo: Estándar MPEG-2 (*Motion Picture Expert Group*), estándar adecuado para comprimir vídeo con calidad de difusión o HDTV a 4 – 6 Mbps y es soportado por ADSL.
- ❑ Topología de la red de distribución: Cada nodo corresponde a una de las centrales de conmutación de la empresa de telefonía pública básica conmutada (TPBC)

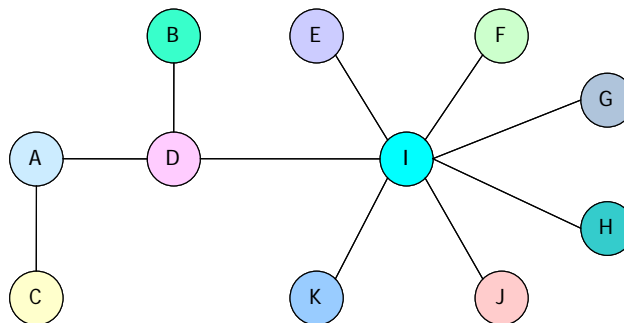


Figura 1. Topología de la red

- Cantidad de abonados potenciales por zonas: número de usuarios que podrían adquirir el servicio de vídeo por demanda (VoD) dada su condición económica.

Como salidas se tienen los resultados del diseño realizado, entre estos están:

- Capacidad para los enlaces entre nodos
- Retardos en cada uno de los enlaces

RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En esta etapa se muestra el procedimiento seguido para lograr cada uno de los resultados esperados enunciados en el apartado anterior.

- Definición de clientes potenciales: estos se determinan de acuerdo a la cantidad de abonados potenciales por zonas.
- Ubicación de los servidores: se ubican servidores locales de acuerdo a la concentración de usuarios potenciales y un servidor principal de acuerdo a la ubicación geográfica de los nodos.
- Distribución de rutas de acceso: una vez ubicados los servidores, se determinan las rutas que tendrán cada nodo ya sea para acceder al servidor principal o a un

servidor local. Se restringe la cantidad de usuarios que podrán tener acceso simultáneo a cada servidor y en qué proporción.

- Determinación del tráfico de un nodo fuente a un nodo destino: se determina el tamaño de la información que va de un nodo a otro de acuerdo al número de usuarios, la tecnología de acceso y la longitud del mensaje, esta última depende de la tecnología del *backbone* (ATM) y del estándar de compresión de video (MPEG-2).
- Cálculo de tráfico por enlaces: en este proceso se tiene en cuenta la topología de la red, el tráfico total se calcula para cada enlace físico existente entre nodos tomando todo el tráfico que lo atraviese. A continuación se presenta el diagrama de seudoflujo que permite observar el procedimiento seguido para este fin, también se muestran las expresiones utilizadas para pasar de un parámetro a otro.

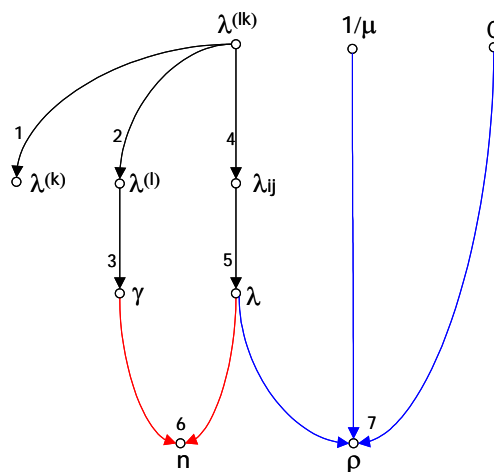


Figura 2. Diagrama para la determinación del tráfico

1. $\lambda^{(k)} = \sum_{l=1}^N \lambda^{(lk)}$; Tráfico que sale de la red por el nodo k
2. $\lambda^{(l)} = \sum_{k=1}^N \lambda^{(lk)}$; Tráfico que ingresa a la red por el nodo l
3. $\gamma = \sum_{l=1}^N \lambda^{(l)}$; Tráfico que ingresa a la red por todos los nodos
4. $\lambda_{ij} = \sum \lambda_{ij}^{(k)}$; Tráfico que atraviesa el enlace ij
5. $\lambda = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$; Tráfico total que atraviesa todos los enlaces
6. $n = \frac{\lambda}{\gamma}$; Número esperado de saltos que da un mensaje desde el origen hasta el destino
7. $\rho = \frac{\lambda}{C} \frac{1}{\mu}$; Factor de utilización

- Cálculo de número esperado de saltos y el factor de utilización: Una vez se conoce el tráfico que atraviesa cada enlace, se calcula el número esperado de saltos y el factor de utilización, el cual depende de la capacidad total asignada para todos los enlaces (C).
- Cálculo de la capacidad para cada enlace: la capacidad para cada enlace se asigna de manera óptima, proporcional, ecualizada y discreta, usando la capacidad total asignada para todos los enlaces (C), el tráfico de los enlaces (λ_{ij}) y la longitud de mensaje ($1/\mu$).

- Estimación del retardo en cada enlace: según las capacidades óptimas, proporcionales, ecualizadas y discretas asignadas, el tráfico por enlace (λ_{ij}) y la longitud del mensaje ($1/\mu$), se determinan los retardos respectivos para cada enlace.

A continuación se presenta el diagrama de pseudoflujo que muestra los pasos seguidos y las expresiones usadas para calcular las capacidades y los retardos para los enlaces.

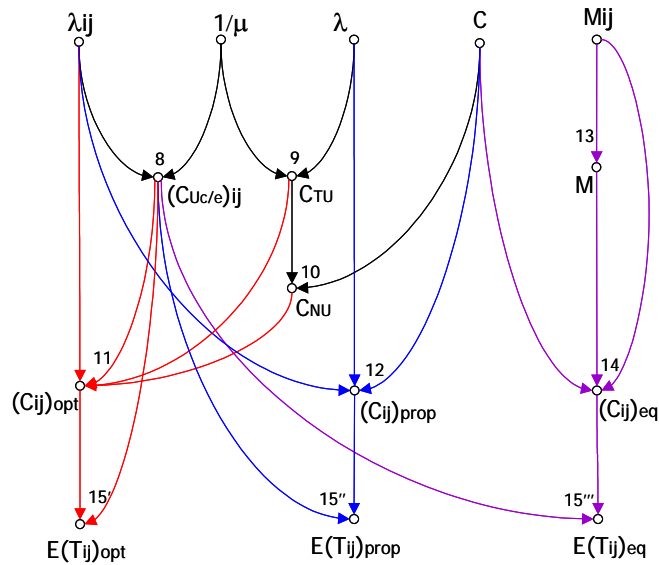


Figura 3. Diagrama para el cálculo de las capacidades y retardos

8. $(C_{Uc/e})_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu}$; Capacidad utilizada por cada enlace ij

9. $C_{TU} = \frac{\lambda}{\mu}$; Capacidad total utilizada

10. $C_{NU} = C - C_{TU}$; C_{NU} : Capacidad no utilizada

$$11. (C_{ij})_{opt} = (C_{uc/e})_j + C_{NU} \frac{\sqrt{\lambda_{ij}}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sqrt{\lambda_{ij}}}; \text{ Capacidad óptima para el enlace } ij$$

$$12. (C_{ij})_{prop} = C \frac{\lambda_{ij}}{\lambda}; \text{ Capacidad proporcional para el enlace } ij$$

$$13. M = \sum_i \sum_j M_{ij}; \text{ Número total de enlaces}$$

$$14. (C_{ij})_{eq} = C \frac{M_{ij}}{M}; \text{ Capacidad ecualizada para el enlace } ij$$

$$15. E(T_{ij}) = \frac{1}{\mu C_{ij} - \lambda_{ij}}; \text{ Retardo para el enlace } ij$$

En el capítulo cuatro donde se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo, se realiza un cálculo tipo para un par de nodos, previamente seleccionado, usando las expresiones para la capacidad y el retardo del enlace mostradas.

SOLUCIÓN POR SOFTWARE

En este paso se encuentra la solución final del problema, es decir el cálculo de las capacidades y los retardos de cada uno de los enlaces, mediante un programa estándar para computadora. Como las expresiones utilizadas son repetitivas, no se realiza un programa en sí, sino que simplemente se usa una hoja de cálculo como Excel para la implementación de la solución por software.

1. VIDEO BAJO DEMANDA

El vídeo bajo demanda (VoD: *Video on Demand*) es un servicio asimétrico que involucra varias conexiones. VoD proporciona la transferencia de vídeo codificado y comprimido digitalmente desde un servidor (típicamente un servidor de vídeo), hacia un cliente (típicamente un STT: *Set Top Terminal* o PC: *Personal Computer*). Dentro del decodificador del STT, el flujo de vídeo es reensamblado, descomprimido, decodificado, convertido de análogo a digital y presentado en un monitor¹.

En este servicio el usuario final tiene un nivel de control predeterminado sobre la selección del material que desea ver como del tiempo en que desea verlo. Las conexiones de vídeo son establecidas bajo demanda mediante señalización usuario – red. Una implicación de este servicio es que la transmisión de un programa debe ser predominantemente punto a punto desde el proveedor de información de vídeo (VIP: *Video Information Provider*) hasta el usuario final. La conexión punto a punto permite algunas características adicionales como reiniciar, retroceder, pausar, adelantar. Las redes que comúnmente proveen estas aplicaciones son las redes

¹ Definición de Vídeo bajo demanda dada en [2] ATM Forum, Audiovisual Multimedia Services: Video on Demand Specifications 1.0. ATM Forum, January 1996.

híbridas de Fibra / Coaxial (HFC: *Hybrid Fiber/Coax*) y las redes digitales banda base como ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) [2].

El servicio de VoD proporciona una comunicación de extremo a extremo de información de audio y vídeo. Esta comunicación normalmente requiere la sincronización de tramas de audio y vídeo dentro del STT. Adicionalmente, la decodificación MPEG-2 y la recuperación de la base de tiempo también es crítica.

1.1 TIPOS DE SERVICIOS DE VÍDEO BAJO DEMANDA

El servicio de video bajo demanda (VoD) puede clasificarse en varias categorías, basadas en la cantidad de interactividad permitida:

Difusión (*Broadcast: No-VoD*)

Este servicio es similar a la difusión de televisión en el cual el usuario es un participante pasivo y no tiene control sobre la sesión. No se considera un servicio de VoD.

Pago por ver (PPV: *Pay Per View*)

Este servicio es en el cual el usuario escoge y paga por una programación específica, es similar a los servicios de televisión por cable (CATV PPV).

Casi vídeo bajo demanda (Q-VoD: *Quasi Video On Demand*)

Es el servicio en el cual los usuarios son agrupados según categorías de interés. Los usuarios pueden realizar actividades rudimentarias de control temporal como el cambio a otro grupo de interés.

Vídeo por demanda aproximado (N-VoD: *Near Video On Demand*)

En este servicio las funciones de adelantar y retroceder son simuladas mediante transiciones en intervalos discretos de tiempo (alrededor de 5 minutos). Esta posibilidad puede proporcionar múltiples canales con la misma programación en distintos intervalos de tiempo.

Vídeo por demanda verdadero (T-VoD: *True Video On Demand*)

Servicio en el cual el usuario tiene completo control sobre la sesión de presentación. El usuario tiene las capacidades completas de las funciones VCR (*Virtual Control Remote*) incluyendo adelantar, retroceder, reproducir, congelar, y posicionamiento aleatorio. Para T-VoD se necesita un sólo un canal, los múltiples canales serán redundantes.

PPV y Q-VoD son servicios adecuados donde la interacción es limitada, por ejemplo ver películas. En estos casos , un controlador local (STB: *Set Top Box*) puede filtrar múltiples canales para prestar el servicio. T-VoD requiere el uso de una señal bidireccional desde el usuario hacia un controlador centralizado, el servicio de T-VoD es esencial para aplicaciones que requieran interactividad múltiple como los juegos

de vídeo, en los cuales la respuesta a otros jugadores es necesaria. El servicio de PPV es el más fácil de implementar y los sistemas de T-VoD son los más difíciles.

Para soportar los servicios de vídeo bajo demanda (VoD), existen varios estándares para la compresión y codificación de vídeo y audio antes de ser transmitido sobre las redes actuales, ya sea conmutadas por circuitos o por paquetes. Puesto que en este trabajo se cuenta con una red de conmutación de paquetes para ofrecer el servicio de VoD, se expone el estándar más comúnmente usado para la compresión de vídeo y audio en este tipo de redes.

1.2 FORMATO DE COMPRESIÓN MPEG²

Existen dos formas de transmisión de datos, analógico y digital. Una de las características del vídeo es que está compuesto por señales analógicas, con lo que se pueden dar las dos formas de transmisión. En los últimos años la transmisión de datos se ha volcado hacia el mundo digital ya que supone una serie de ventajas frente a la transmisión analógica. Al verse la información reducida a un flujo de bits, se consigue una mayor protección contra posibles fallos ya que se pueden introducir mecanismos de detección de errores, se elimina el problema de las interferencias, se puede disminuir el efecto del ruido en los canales de comunicación, conseguir

² Tomado de: [9] Normas ISO de codificación de contenidos audiovisuales.

codificaciones más óptimas y encriptado, mezclar con otros tipos de información a través de un mismo canal, y poder manipular los datos con computadores para comprimirlos, por ejemplo. Además si se quiere difundir el vídeo por vías digitales se debe digitalizar, con lo que debe ser capturado en su formato analógico y almacenado digitalmente logrando así que sea menos propenso a degradarse durante la transmisión.

El vídeo es muy sensible al retardo de la red, ya que puede provocar cortes en las secuencias. La pérdida de alguna información en el vídeo sin comprimir no es muy relevante, ya que al perderse un fotograma, el siguiente fotograma proporciona la suficiente información para poder interpretar la secuencia. En cambio el vídeo comprimido es mucho más sensible a errores de transmisión, ya que las técnicas de compresión que se valen de la redundancia espacial y temporal pueden perder la información de esta redundancia y los efectos de la falta de datos pueden propagarse en los próximos fotogramas. La información a digitalizar será la de las imágenes, cada cuadro de la imagen es muestreado en unidades de píxeles, con lo que los datos a almacenar serán los correspondientes al color de cada píxel.

Tres componentes son necesarias y suficientes para representar el color y para ser interpretado por el ojo humano. Cada punto en las imágenes tiene asignado un determinado número de bits que representarán el color de dicho punto. Si la imagen es en blanco y negro, bastará un bit para representarlo, mientras que para 256 colores serán necesarios 8 bits. De esta forma se tendrá la imagen digitalizada, pero

almacenar esta información dependerá del número de píxeles que se utilicen por imagen. Por ejemplo una imagen de 640 x 480 puntos con 256 colores ocupa 300 Kbytes, y si se tiene una secuencia de vídeo a 25 fotogramas por segundo significaría una tasa de más de 61 Mbps y todo esto sin tener en cuenta el audio. La información de vídeo compuesta de esta manera posee una cantidad tremenda de información; por lo que, para transmisión o almacenamiento, se requiere de la compresión de la imagen.

1.2.1 Compresión de vídeo

La compresión del vídeo generalmente implica una pérdida de información y una consecuente disminución de calidad. Pero esto es aceptable porque los algoritmos de codificación están diseñados para descartar la información redundante o que no es perceptible por el ojo humano. Aunque se sabe que la calidad del vídeo es inversamente proporcional al factor de compresión. La compresión es un arma de doble filo, ya que el vídeo comprimido es más sensible a los errores. Un error en vídeo comprimido puede hacer ilegible la imagen, con lo que se añade redundancia para recuperar esa información.

Dentro de los principales algoritmos usados para comprimir vídeos y que han sido estándares internacionales está el formato MPEG (*Moving Picture Experts Group*), MPEG es el grupo de trabajo del subcomité del ISO/IEC (*International Organization*

for Standardization / International Electrotechnical Commission) encargado del desarrollo de las normas internacionales para la compresión, descompresión, procesado y codificación de imágenes animadas, audio o la combinación de ambas.

Los estándares MPEG fueron desarrollados para ser independientes de la red específica para proporcionar un punto de interoperabilidad en entornos de red heterogéneos. MPEG trabaja por fases, las fases se identifican con números (MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, MPEG-7). Estas fases no describen diversas versiones de una única norma, sino que son normas completamente distintas que se encargan de aspectos diferentes de la comunicación multimedia. Así, las últimas fases no reemplazan a las anteriores sino que las complementan. Tanto en MPEG-1 como en MPEG-2 se han definido tres capas diferentes. A veces son llamadas incorrectamente "niveles". Cada capa representa un conjunto de algoritmos de codificación. Las capas se suelen identificar con números romanos: Capa I, Capa II y Capa III. El concepto de versión sólo se usa en MPEG-4, la versión 1 de MPEG-4 proporciona una serie de herramientas para la codificación del audio, con la versión 2, se añaden nuevas herramientas que incrementan la utilidad pero que no reemplazan a las herramientas de la versión 1. La versión 2 es por lo tanto completamente compatible con la versión 1.

MPEG-1

El primer estándar que el MPEG introdujo fue MPEG-1, usado para compresión de vídeo en CDs. MPEG-1 usa una baja tasa de bit, similar a la resultante de una cinta

de vídeo VHS. MPEG-1 se considera como un vídeo solamente progresivo (no entrelazado), que alcanza una tasa de 1.5 Mbps. La entrada de vídeo es usualmente convertida primero al formato estándar de entrada MPEG SIF (*Standard Input Format*). El espacio de color adoptado es Y- Cr- Cb. En el MPEG-1 SIF el canal de luminancia es de 352 píxeles x 240 líneas y 30 cuadros/segundo.

MPEG-2

Los distribuidores querían economizar la transmisión digital, pero dado que MPEG-1 no era adecuado para el satélite, se desarrolló MPEG-2 que se terminó convirtiendo en el estándar en el mundo de la televisión digital ya que arregla muchos de los problemas inherentes a MPEG-1, tales como la resolución, escalabilidad y manejo de vídeo entrelazado. MPEG-2 permite imágenes de mucha más calidad (hasta niveles de HDTV) y permite que muchos canales de diferentes tasas de bit se multiplexen dentro de un mismo flujo de datos. MPEG-2 también consta de tres capas (o estándares), cubiertas por la: ISO/IEC 13818-1 Sistemas MPEG-2 (ITU-T Rec. H.222.0), ISO/IEC 13818-2 Vídeo MPEG-2 (ITU-T Rec. H.262) y ISO/IEC 13818-3 Audio MPEG-2, aprobadas finalmente como estándar la ISO/IEC en Noviembre de 1994.

Con una calidad superior al MPEG-1, MPEG-2 fue universalmente aceptado para transmitir vídeo digital comprimido con velocidades mayores. Con MPEG-2 pueden conseguirse elevadas relaciones de hasta 100:1, dependiendo de las características del propio vídeo. MPEG-2 normalmente define dos sistemas de capas, el flujo de

programa y el flujo de transporte. Se usa uno u otro pero no los dos a la vez. El flujo de programa funcionalmente es similar al sistema MPEG-1. La técnica de encapsulamiento y multiplexación de la capa de compresión produce paquetes grandes y de varios tamaños. Los paquetes grandes producen errores aislados e incrementan los requerimientos de buffers en el receptor/decodificador para demultiplexar los flujos de bits. En contraposición el flujo de transporte consiste en paquetes fijos de 188 bytes lo que decrementa el nivel de errores ocultos y los requerimientos de buffers en el receptor.

MPEG-4

Al principio, el estándar MPEG-4 se creó como un intento para mejorar la calidad del vídeo codificado de bajas velocidades a través de la estandarización de nuevas técnicas mejoradas de compresión, orientado inicialmente a las videoconferencias e Internet. Más adelante, su progresión recondujo este estándar al mundo de la TV interactiva, la computación y las telecomunicaciones. El objetivo es crear un contexto audiovisual en el cual existen unas primitivas llamadas AVO (objetos audiovisuales). Se definen métodos para codificar estas primitivas que podrían clasificarse en texto y gráficos. La importancia del MPEG-4 se ve en la cantidad de aplicaciones que se han anunciado a propósito de él. La industria del cable ha anunciado un intento de sustituir la actual implementación del MPEG-2, por el MPEG-4 en un futuro no muy lejano. Esta es una decisión obvia, ya que el MPEG-4 permitirá a la industria duplicar o triplicar el número de canales disponibles sobre el

ancho de banda existente, al igual que permitir la televisión interactiva (ITV) y el video bajo demanda (VoD).

1.2.2. Compresión de audio

Una señal de audio digital típica, como la grabada en un CD, está formada por muestras de 16 bits tomadas con una frecuencia de 44,1 muestras por segundo. De esta forma, se necesitan algo más de 1,4 Mbits para almacenar tan sólo un segundo de música estéreo. Por otra parte, tanto la capacidad de almacenamiento de los servidores como el ancho de banda disponible para la transmisión de datos son unos bienes escasos.

Así pues, ha sido necesario buscar algún sistema que permita representar digitalmente el sonido empleando menos bits y manteniendo la máxima calidad posible. Para ello se desarrolló un sistema de compresión de datos llamado codificación perceptiva. Este tipo de codificación se fundamenta en el conocimiento del procedimiento que emplea el sistema auditivo humano para transformar los sonidos en una percepción sonora. La codificación perceptiva no pretende reproducir una señal de audio tal como es en la realidad, sino que se "conforma" con que la señal reproducida suene prácticamente igual que la original para un ser humano. Esto se consigue eliminando de la señal original aquellas partes que no pueden ser procesadas por el sistema auditivo humano, es decir, las que no se pueden oír.

MPEG-1

Contempla la codificación de uno (mono) o dos (estéreo/dual) canales de audio digital con frecuencias de muestreo de 32, 44.1 ó 48 kHz. La velocidad de transmisión varía entre 32 y 448 Kbps en la Capa I, entre 32 y 384 Kbps en la Capa II, y entre 32 y 320 Kbps en la Capa III.

MPEG-2 BC

Es una ampliación retrocompatible (BC: *Backwards Compatible*) de la norma MPEG-1. Admite hasta 5 canales principales más un canal LFE (*Low Frequency Enhancement*: refuerzo de bajas frecuencias). Aumento de la velocidad de transmisión hasta aproximadamente 1Mbps. Permite el uso de frecuencias de muestreo menores: 16, 22.05 y 24KHz para velocidades de transmisión entre 32 y 256Kbps (Capa I), y entre 8 y 160 Kbps (Capa II y Capa III).

MPEG-2 AAC

Es una norma de compresión de muy alta calidad. Admite hasta 48 canales de audio y frecuencias de muestreo desde 8 hasta 96KHz con capacidad multicanal, multiidioma y multiprograma. Las velocidades de transmisión van desde 8 Kbps (señal vocal monofónica) hasta más de 160 Kbps/canal para señales de muy alta calidad que permiten ciclos múltiples de codificación-decodificación.

MP3

Inicialmente la extensión de archivo *.mp3 se creó cuando surgieron los primeros

programas de codificación y decodificación (codecs) MPEG-1 Capa III para Windows. Tras la normalización del MPEG-2, los ficheros codificados con las velocidades de transmisión más bajas -Capa III del MPEG-2- también son llamados ficheros MP3. En definitiva, todo MPEG-1/2 Capa III es un MP3. Desde que se aprobara el MP3 en 1991, se ha progresado enormemente en el desarrollo de algoritmos de codificación perceptiva de audio. De entre ellos, el MPEG-2 AAC (*Advanced Audio Coding*) y el MPEGplus serán los probables sucesores del MP3.

2. ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DE VOD

La arquitectura de un sistema interactivo de vídeo bajo demanda (VoD) consta de tres partes principales: proveedor del servicio (un servidor de vídeo), un sistema de distribución (una red) y un sistema cliente final (usuario). Cada parte se subdivide en componentes e interfaces. En la figura 4, se muestra a grandes rasgos estos componentes e interfaces del sistema de VoD sobre la infraestructura de una red de Telefonía Pública Básica Conmutada (RTPBC)

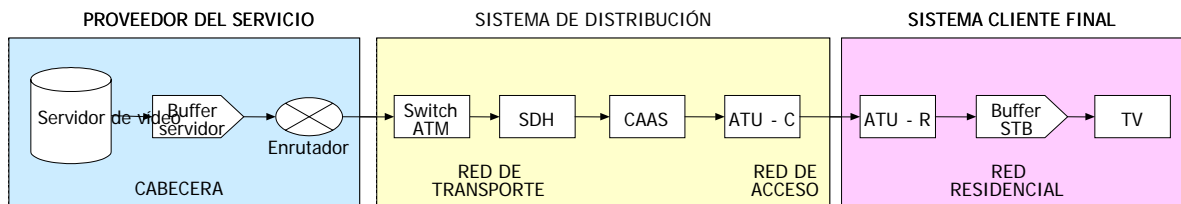


Figura 4. Esquema básico de un sistema de VoD

El servidor de vídeo juega un papel importante en el sistema de VoD, cuando un nuevo usuario realiza una solicitud, las señales de control deben determinar si hay suficientes recursos tales como ancho de banda y disponibilidad del canal de la red para el usuario. Luego, el controlador de almacenamiento recupera la película solicitada de un disco y la transmite al usuario a través de una red de alta velocidad.

El sistema de distribución incluye una red de transporte de alta velocidad y una red de acceso. La red de transporte es una red ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), la cual es usada para transmitir vídeo por su característica de calidad de servicio (QoS), lo cual garantiza la entrega de flujos de vídeo de manera continua y bajos retardos en la transmisión. La red de acceso es ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), por ser soportada por las líneas telefónicas existentes en la empresa de TPBC. En esta red se incluye el equipo DSL (*Digital Subscriber Line*), ubicado en la central de conmutación y permite el acceso a múltiples usuarios, DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), seguido se encuentra un dispositivo llamado ATU-C (*ADSL Transceiver Unit Central*), el cual identifica los puertos ADSL del DSLAM.

El sistema cliente final consta de un ATU-R (*ADSL Transceiver Unit Remote*), que identifica el modem ADSL del usuario, una caja de control o STB (*Set-Top Box*) y un televisor. El STB incluye un decodificador para las señales MPEG-2 y *buffers* (memorias temporales) para almacenar la película antes de ser reproducida en un televisor. El STB y el televisor podrían sustituirse por un computador personal con las tarjetas e interfaces adecuadas.

2.1 PROVEEDOR DE SERVICIO

Corresponde a lo que comúnmente se conoce como "cabecera", término originado en la industria del cable, es usado para denotar el lugar donde se localiza el

contenido para los canales de televisión, el vídeo bajo demanda, el acceso a Internet, entre otros. Para la prestación del servicio de vídeo bajo demanda, lógicamente el elemento fundamental del proveedor es el servidor de vídeo, el cual es el encargado de almacenar y proporcionar el acceso a los vídeos.

2.1.1 Servidores de vídeo

El servidor de vídeo puede ser considerado como un disco duro de grandes proporciones capaz de transferir datos a alta velocidad a muchos usuarios simultáneamente. Cuando se consideran la tolerancia a fallas y la robustez de servicios interactivos residenciales surgen inconvenientes como:

- ❑ Diseñar un protocolo de acceso tolerante a fallas que desarrolle una búsqueda eficiente en una base de datos para la conexión y enrute acertadamente para minimizar la probabilidad de interrupción en la prestación del servicio cuando el servidor de vídeo falle durante una conexión.

- ❑ Reproducir los contenidos del servidor de vídeo con costos eficientes.

Estos inconvenientes se basan en que se supone que el servidor de vídeo, aunque lógicamente es una sola entidad, probablemente serán distribuidos a través de la red dependiendo de la alta demanda de títulos, la arquitectura de la red, y las

ventajas de una arquitectura distribuida para incrementar la capacidad. Hay varias consideraciones importantes en el diseño de un servidor de vídeo factible, entre estas están:

- ❑ Esquema de almacenamiento jerárquico
- ❑ Arquitectura escalable
- ❑ Subsistema de almacenamiento
- ❑ Almacenamiento expandido

A continuación se describen con más detalle el esquema y el subsistema de almacenamiento.

2.1.1.1 Esquema de almacenamiento jerárquico

En este se requiere un algoritmo de localización de medios que permita pasar de un medio de almacenamiento a otro de acuerdo a la demanda relativa de los programas. La jerarquía de almacenamiento se presenta de acuerdo al desempeño, como sigue:

- ❑ RAM (*Random Access Memory*): es el medio de almacenamiento mas rápido, pero más costoso. Adecuado para películas de las que se están enviando partes distintas a destinos diferentes al mismo tiempo.

- RAID (*Redundant Array of Inexpensive Disks*): es una forma de almacenar la misma información en distintos lugares (por tanto de modo redundante) en múltiples discos duros. Provee un tiempo de acceso 10 ms, capacidad 10 GB, guarda las películas que se están transmitiendo.

- Disco óptico: Proporciona tiempo de acceso 100 ms, capacidad 4 GB (una película), se usa solo para almacenamiento.

- Cinta magnética: es el medio de almacenamiento más económico para almacenar grandes volúmenes de información, requiere un mayor tiempo de acceso y posee una capacidad 8 GB (dos películas)

2.1.1.2 Subsistema de almacenamiento

El subsistema de almacenamiento consta de unidades de control, almacenamiento de discos y mecanismos de acceso. Hay varias técnicas para incrementar el desempeño mediante el entrelazado de datos digitales de un programa sobre discos múltiples, entre estas están:

- *Striping*: involucra porciones entrelazadas de bloques de discos en varios discos. El objetivo es reducir la latencia del acceso a bloques mediante la lectura paralela de un bloque completo.

- *Declustering*: distribuye bloques de archivos en varios discos, por lo tanto permite acceso paralelo a bloques de un mismo archivo e incrementa la velocidad de las tramas de vídeo.

- Replicación: reproduce los archivos entre los servidores de acuerdo con la demanda de los programas, la dispersión relativa de los usuarios y el patrón de acceso, por ejemplo el acceso durante las horas pico o acceso simultáneo de usuarios.

Debido a los requerimientos del servicio de vídeo bajo demanda, los servidores deben garantizar acceso rápido y suministrar gran variedad de información a la mayor cantidad de usuarios simultáneos haciendo uso de un amplio ancho de banda, por ésta razón se definen servidores principales y servidores locales de *spooling*. Los servidores principales almacenan la mayor cantidad de vídeos y generalmente se ubican en un punto central de la red y en los servidores locales se pre- posicionan los vídeos más recientes y populares, y se ubican más cerca del usuario, de esta manera se ahorra ancho de banda durante las horas pico de mayor tráfico en la red.

Puesto que un servidor de vídeo en realidad es sólo un dispositivo masivo de entrada / salida en tiempo real, necesita una arquitectura hardware y software diferente a la de un computador personal o una estación UNIX. En la figura 5 se muestra la arquitectura del hardware de un servidor de vídeo típico [12].

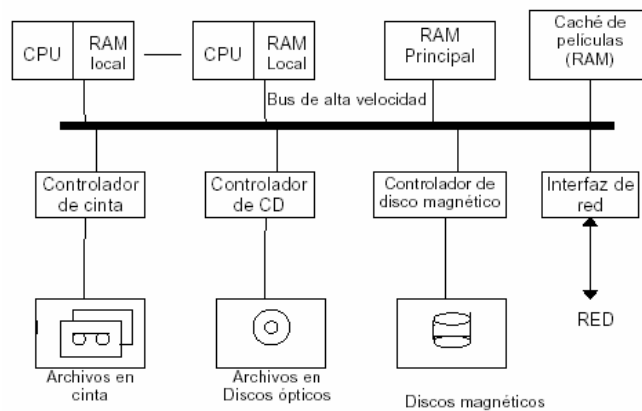


Figura 5. Arquitectura del hardware de un servidor de video típico³

2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Dentro de lo que se denomina en este trabajo sistema de distribución se encuentran las redes que interconectan y entregan la información al usuario final. Consta de un *backbone* ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) conectado a una red de acceso local ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*).

2.2.1 Red de transporte

Por tratarse de una empresa de Telefónica Pública Básica Conmutada (TPBC) que ha sido adaptada para ofrecer, a través de un único acceso, los servicios de voz, datos y vídeo en una red telefónica completamente digital (RDSI-BA: Red Digital de Servicios Integrados de banda ancha), cuenta con la tecnología ATM (*Asynchronous*

Transfer Mode) adecuada para el propósito de ofrecer servicios interactivos como video bajo demanda por realizar conexiones basadas en conmutación de paquetes.

El modo de transferencia asíncrono (ATM: *Asynchronous Transfer Mode*) combina el encaminamiento de la conmutación de circuitos con la multiplexación asíncrona de la conmutación de paquetes. Esto se alcanza estableciendo una conexión (o ruta fija) a través de la red antes de aceptar cualquier tipo de tráfico. La información se envía en paquetes denominados celdas o células de longitud fija de 53 bytes, aunque en algunas aplicaciones tales como vídeo digital se usan celdas de longitud fija de 188 bytes. Los conmutadores encaminan a las celdas de acuerdo a la información de direccionamiento que transportan en su cabecera de 5 bytes, para el caso de celdas de 53 bytes. El tráfico existente sobre un determinado enlace consistirá de celdas entrelazadas de manera aleatoria pertenecientes a diferentes conexiones. La red garantiza que todas las celdas de una conexión siguen la misma ruta y que son repartidas en el mismo orden en que fueron enviadas, es decir, mantiene la integridad de la secuencia de las celdas [3]. Entre las ventajas que presenta ATM están:

- ❑ La infraestructura de la red y su administración se simplifica un único modelo de transferencia.
- ❑ No está limitada por la velocidad o la distancia: la conmutación permite operar a través de las LAN (Redes de Área Local) y a través de las redes de gran

³ Fuente: [12] TANENBAUM, Andrew S. Redes de Computadores. Tercera Edición. Prentice

ancho de banda mundiales, a velocidades que oscilan desde unos cuantos Mbps hasta varios Gpbs.

- La calidad de servicio (*QoS: Quality of Service*) de ATM le permite transportar voz, datos y vídeo. Por lo tanto, la hace apropiada para dar soporte a una red de servicios integrados.

La teoría sobre ATM es bastante extensa y como lo que se pretende en este trabajo es definir las características de ATM más útiles en aplicaciones de vídeo, se hace énfasis en las categorías de servicio, en los parámetros de calidad de servicio y en la capa de adaptación.

2.2.1.1 Parámetros de calidad de servicio (QoS)

Un objetivo fundamental en ATM es proporcionar garantías de QoS (*Quality of Service*) durante la transferencia de celdas a través de la red. La QoS proporcionada por la red se especifica en términos de parámetros a nivel de celda. Se han especificado un total de seis parámetros de QoS. Los primeros tres parámetros se utilizan durante el establecimiento de la conexión y son indicadores del funcionamiento intrínseco de la red.

Porcentaje de celdas erróneas (CER: *Cell Error Ratio*)

Es la proporción de celdas con uno o más bits erróneos. El CER depende del medio físico subyacente. En el cálculo del CER se excluyen los bloques de celdas severamente erróneos.

Porcentaje de celdas insertadas (CMR: *Cell Misinsertion Ratio*)

Es el número promedio de celdas por segundo que se envían erróneamente hacia una conexión destino dada, es decir aquellas provenientes de un origen erróneo.

Porcentaje de bloques de celdas severamente erróneas (SECBR: *Severely Errored Cell Block Ratio*)

Es el porcentaje de bloque celdas severamente erróneos de entre el total de bloques de celdas transmitidas en una conexión. Se produce un bloque de celdas severamente erróneo cuando más de M celdas se pierden por error, o se encuentran erróneamente en un bloque de N celdas recibidas, donde M y N se definen por el operador de la red.

Los siguientes tres parámetros se pueden negociar entre el usuario y la red durante el establecimiento de la conexión.

Porcentaje de celdas perdidas (CLR: *Cell Loss Ratio*)

Es la proporción de celdas perdidas con respecto al número total de celdas transmitidas. El grado de negociación del CLR depende de la sofisticación de las

estrategias de almacenamiento en las memorias temporales disponibles en la red.

Retardo de transferencias de celdas (CTD: *Cell Transfer Delay*)

Es el tiempo que transcurre en que una celda entra en la red a través de la interfaz usuario – red (UNI: *User Network Interface*) origen hasta el instante en que llega a la UNId destino. El CTD incluye los retardos de propagación, de procesamiento, y los retardos de las colas de los multiplexores y conmutadores.

Variación en el retardo de celdas (CDV: *Cell Delay Variation*)

Mide la variación del retardo total de las celdas de una conexión.

La intención para ATM es que debería ser capaz de garantizar una calidad de servicio en términos de caudal de celdas perdidas y variaciones en el retraso de las celdas. Retrasos y pérdidas durante la transmisión de celdas ATM son inevitables, los retrasos son producidos principalmente por el almacenamiento de las celdas en memorias temporales (*buffers*) intermedios y dependen del estado de carga de los enlaces que varia de forma dinámica, las pérdidas de celdas se producen principalmente por el desbordamiento de los buffers intermedios debido a la multiplexación estadística utilizada en ATM, la pérdida de celdas es de magnitud y duración igual a la del desbordamiento del buffer. También se pueden producir pérdidas de celdas por encaminamientos erróneos en los conmutadores debido a errores de bits en las cabeceras, pero esto es menos probable y afecta en una

menor medida a la pérdida global [4]⁴.

2.2.1.2 Categorías de servicio ATM

Es posible establecer conexiones ATM de propiedades arbitrarias con respecto al tráfico y la calidad de servicio. Ello se puede realizar seleccionando los valores de los descriptores y para los parámetros negociables de QoS. El Foro ATM ha definido cinco categorías de servicios. Las dos primeras aplican a conexiones en tiempo real, en el sentido de contar con fuertes restricciones en cuanto a retardos y temporización, como las que se tienen en aplicaciones de vídeo digital y las otras tres se han definido para conexiones que no son de tiempo real.

Velocidad constante (CBR: *Constant Bit Rate*)

Este servicio permite al usuario definir un retardo de celdas específico, una variación de retardo de celdas (CDV) y reservar un ancho de banda fijo constante dentro de la red.

Velocidad variable de tráfico en tiempo real (rt-VBR: *Real Time Variable Bit Rate*)

Este servicio está destinado a aplicaciones sensibles al tiempo, por ejemplo las que requieren retardos y variaciones de retardo rigurosas, podría ser apropiado para

⁴ Ver anexo: Mapa conceptual sobre [4] CUENCA, Pedro. OLIVARES, Teresa. LOZANO, María. CAMINERO, Blanca. Artículo: "Transmisión robusta de señales de vídeo sobre redes de banda ancha". Departamento de Informática. Universidad de Castilla - La Mancha. Albacete (España)

aplicaciones de voz y vídeo. rt-VBR puede soportar multiplexación estadística de fuentes en tiempo real.

Velocidad variable de tráfico no de tiempo real (nrt-VBR: *Non Real Time Variable Bit Rate*)

Esta categoría es desarrollada para aplicaciones en las cuales se tienen características de tráfico a ráfagas y no se tienen restricciones de retardo y variación de retardo. La QoS se especifica mediante el porcentaje de celdas perdidas CLR.

Velocidad disponible (ABR: *Available Bit Rate*)

Esta destinada a los orígenes que pueden adaptar dinámicamente su velocidad en función de la realimentación de la red. Este servicio permite a las fuentes explotar el ancho de banda que se encuentra disponible en la red en un momento dado.

Velocidad no especificada (UBR: *Unspecified Bit Rate*)

Este servicio no proporciona ninguna garantía de QoS, es apropiado para aplicaciones no críticas que pueden tolerar o adaptarse fácilmente a la pérdida de celdas.

2.2.1.3 Capa de adaptación ATM

Cualquier aplicación que opere sobre una red ATM puede elegir entre cualquiera de cinco categorías de servicios. Cada aplicación conlleva la transferencia de uno o más

bloques o flujos de información a través de la red. Las categorías de servicios ATM proporcionan funciones que hacen frente a retardos y pérdidas de celdas. Como mínimo, el origen debe realizar una conversión de los bloques de datos de la aplicación a celdas ATM y el destino debe realizar una reconversión de éstas a los bloques de datos de la aplicación. Uno de los objetivos de la capa de adaptación ATM (AAL: *ATM Adaptation Layer*) es proporcionar las correspondencias entre bloque de datos y celdas. Las diferentes aplicaciones requieren combinaciones de funciones en AAL. AAL se divide en dos subcapas:

- Segmentación y reensamblado (SAR: *Segmentation And Reassembly*): El objetivo de esta capa es segmentar las PDU (Unidades de datos de protocolo) de la capa superior en el origen en bloques que se puedan insertar en las cargas útiles de las celdas, y reensamblar las PDU en el destino a partir de celdas recibidas.

- Convergencia (CS: *Convergence Sublayer*): está dividida en una parte común (CPCS: *Common Part Convergence Sublayer*) y en una parte específica del servicio (SSCS: *Service Specific Part Convergence Sublayer*). La CPCS realiza la división de los paquetes en tramas y la detección de errores, funciones requeridas por todos los usuarios AAL. La SSCS proporciona funciones que dependen de los requisitos específicos de las clases de usuarios AAL. Como consecuencia, generalmente cada AAL tiene una subcapa SAR y una subcapa CPCS específicas y varias subcapas SSCS opcionales.

Capa de adaptación ATM tipo 1 (AAL1)

Da soporte a servicios que requieren la transferencia de información a velocidad constante. Por ejemplo, la voz codificada mediante PCM a 64 kbps y vídeo digital a velocidad constante.

Capa de adaptación ATM tipo 2 (AAL2)

Tiene como finalidad la transferencia de paquetes cortos a baja velocidad y bajo retardo, haciendo uso eficiente del ancho de banda. Un ejemplo en el que se requiere esta funcionalidad es la transferencia de información de voz comprimida desde una estación base de un sistema celular digital hasta el centro de conmutación.

Capa de adaptación ATM tipo 3 /4 (AAL3/4)

Inicialmente se desarrollo la capa AAL de tipo 3 (AAL3) para aplicaciones que generan tráfico a modo de ráfagas que se debe transferir mediante conexiones orientadas a conexión, con bajo porcentaje de pérdida de celdas y sin restricciones de retardo. De forma similar, la capa AAL de tipo 4 (AAL4) se definió para las transferencias no orientadas a conexión del tipo de tráfico a ráfagas. Finalmente se combinaron AAL3 y AAL4 para producir AAL3/4, la cual se puede utilizar para las transferencias orientadas o no a conexión. AAL3/4 permite que los mensajes largos de múltiples usuarios se puedan multiplexar simultáneamente e intercalar en el mismo canal virtual ATM.

Capa de adaptación ATM tipo 5 (AAL5)

AAL5 renuncia a la capacidad de multiplexación de AAL3/4, pero proporciona los modos de mensaje y de flujo, así como el envío fiable y no fiable. Es la capa AAL más ampliamente usada.

Las recomendaciones realizadas por el Foro ATM sobre aplicaciones de vídeo que incluyen desde la video conferencia de baja velocidad hasta el vídeo bajo demanda tratan las siguientes cuestiones: AAL5 sobre CBR (*Constant Bit Rate*) podría transportar paquetes MPEG-2 (cada uno de 188 bytes) con suficiente variación de retardo como para permitir la recuperación de la temporización en las capas de los sistemas MPEG-2⁵.

2.2.2 Red de acceso

Los servicios de video bajo demanda (VoD) requieren sesiones de larga duración y la transferencia continua de una cantidad enorme de datos a usuarios residenciales usando los estándares actuales. Por ejemplo, el vídeo de entretenimiento comprimido con calidad de difusión usando el estándar MPEG requiere anchos de banda entre 1.5 Mbps y 6 Mbps, por lo cual se han desarrollado esquemas que puedan entregar datos a estas velocidades sobre los enlaces de comunicación existentes.

⁵ Recomendación enunciada en: [7] LEON-GARCIA. Redes de Computadores. Conceptos Fundamentales y Arquitectura Básica. España 2002. Mc Graw Hill. p.575

2.2.2.1 Tecnologías de acceso

Algunos de los esquemas disponibles para enviar vídeo a alta velocidad son: CATV, FTTC, FTTH, HFC, ADSL, entre otras.

Televisión por cable (CATV: *Cable Television*)

Esta tecnología usa sistema de difusión por cable coaxial y puede soportar múltiples tramas de video comprimido usando MPEG. CATV tiene amplios anchos de banda y puede soportar cientos de conexiones simultáneas, es el sistema que más se ha desarrollado. El costo del servicio de VoD podría ser bajo comparado con otros sistemas. Sin embargo se requiere la adaptación para permitir comunicación bidireccional para ofrecer servicios interactivos como T-VoD.

Fibra hasta la casa (FTTH: *Fiber To The Home*)

Este sistema propone tender fibra óptica a todas las casas, en este se puede tener una portadora OC-1, OC-3 o inclusive mayor, si se requiere. Esta solución es la que mejor se ajusta al tipo de servicio de VoD, pero en lo económico no es viable por ser la más costosa.

Fibra hasta la acera (FTTC: *Fiber To The Curb*)

En este sistema, la empresa de TPBC instala fibra óptica desde la central de conmutación hasta una caja dentro de un barrio residencial, terminando en un dispositivo llamado Unión de red óptica (ONU: *Optical Network Unit*). En una ONU

pueden terminar hasta 16 lazos locales de cobre, estos lazos son lo bastante cortos para operar T1 (1,544 Mbps) o T2 (6,312 Mbps) dúplex integral en ellos, permitiendo películas MPEG-1 y MPEG-2, respectivamente

Híbrido Fibra / Coaxial (HFC: *Hybrid Fiber Coax*)

Esta es la solución que están instalando los proveedores de televisión por cable. En esta se podría asignar un canal dedicado de 4 Mbps a cada casa, capaz de transportar alguna combinación de programas MPEG-1, MPEG-2, datos ascendentes, telefonía analógica y digital, entre otros. Aunque es estupendo para la aplicación de VoD, requiere que los proveedores reemplacen por completo toda la infraestructura de televisión por cable.

Línea asimétrica digital de abonado (ADSL: *Asymmetric Digital Subscriber Line*)

Este sistema proporciona al usuario un canal de enlace descendente de 1,536 Mbps, un enlace ascendente de 16 kbps y un canal analógico de 4 kHz sobre la infraestructura de par trenzado de cobre. No requiere infraestructura adicional en su instalación si el usuario se encuentra hasta 5,5 km de la central de conmutación de la empresa de TPBC.

Se expone un poco más sobre ADSL por ser esta la tecnología con que cuenta la empresa de TPBC para ofrecer el servicio de vídeo bajo demanda (VoD). Inicialmente ADSL estaba enfocado a ofrecer servicios de vídeo a una velocidad no

superior a 1,5 Mbps, sin embargo actualmente se ofrecen hasta 9 Mbps en sentido red - usuario, y 800 kbps en sentido usuario - red, lo que resulta muy adecuado para las necesidades que se plantean tanto para los servicios de vídeo interactivos como los de acceso a Internet y otros servicios multimedia. Estas velocidades están limitadas a 2 Mbps para longitud de bucle de abonado de 4,6 km y 6,1 Mbps para longitudes de bucle inferiores a 2,7 km⁶.

Aunque el uso de ADSL es la opción más evidente para un rápido despliegue de servicios multimedia sobre pares telefónicos, esta presenta algunas limitaciones importantes, dos de las cuales son:

- ❑ No puede tratarse de un servicio universal, debido a la inevitable existencia de pares de abonado que exceden la longitud permitida.
- ❑ El ancho de banda está limitado a 6 Mbps en el caso más favorable, lo cual limita los servicios multimedia que se pueden ofrecer. Por ejemplo, el usuario solamente puede acceder de manera simultánea a un canal de televisión codificado en MPEG-2.

Para establecer la conexión entre la red de acceso y el usuario, en cada central de conmutación se deben ubicar el equipo que permite el acceso a múltiples usuarios

⁶ Alcance en función del régimen binario (sentido descendente) para sistemas ADSL sobre pares de 0,4 mm, según: EYAL AYALON, TZACHI LEVY, GUY KERER, Universidad de Tel Aviv: www.alliancedatacom.com y DSL Forum: www.adsl.com

(DSLAM: *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) y el dispositivo que identifica los puertos ADSL del DSLAM (ATU-C: *ADSL Transceiver Unit Central*). En la parte del sistema del cliente final se debe ubicar el modem del usuario (ATU-R: *ADSL Transceiver Unit Remote*). La infraestructura del DSLAM debe ser capaz de proveer un flujo de datos tan alto como la demanda a fin de aprovechar el potencial asociado con el envío de vídeo a los usuarios, este requisito se traduce en un embotellamiento de datos. A continuación se expone en que consiste el problema de embotellamiento y la solución propuesta por Streambox TV⁷

2.2.2.2 Embotellamiento en la red de acceso

La oferta de vídeo bajo demanda que la empresa de TPBC puede hacer a sus abonados ADSL está limitada por el embotellamiento de datos: mientras un sitio remoto (servidor) puede enviar por lo menos 200 películas a las líneas ADSL, cada una a 800 kbps, con lo que se necesitan alrededor de 160 Mbps para transmitir las. El ancho de banda entre la central de conmutación (CO) y el DSLAM es de 45 Mbps, lo que restringe el número de películas a 56 (45 Mbps/0.8 Mbps).

Para evitar el embotellamiento, Streambox TV propone usar una arquitectura de servidores cache, en donde se almacene temporalmente el mismo contenido

⁷ Esta solución se encuentra expuesta en: [11] STREAMBOX. "The Cache Server: Streambox solves the DSLAM bottleneck problem", December 2001. Ubicado en: <http://www.streambox.com/technology/Streambox%20Client%20White%20Paper.pdf>

multimedia en diferentes servidores entrelazados, ubicados en cada central de conmutación, de esta manera si un servidor o disco duro fallan entonces otro servidor cache puede asumir la solicitud, garantizándose el envío de un número ilimitado de contenido multimedia, sin congestión del servidor y usando apropiadamente el ancho de banda la central de conmutación (CO) y el DSLAM. Teniendo una estructura de servidores cache, el contenido multimedia se replica en extremo de la red es decir mas allá del embotellamiento producido en el DSLAM.

En la solución del embotellamiento mostrado en la figura 6, un switch ATM se encuentra conectado tanto a los DSLAMs como a los servidores a velocidades de enlaces de portadores ópticos (OC: *Optical Carrier*) OC-3/OC-12 (155/622 Mbps), y a la central telefónica se conecta a una velocidad de enlace de 45 Mbps, de tal forma que, el ancho de banda de salida de la central de conmutación nunca va a limitar las velocidades de entrega de las tramas de video.

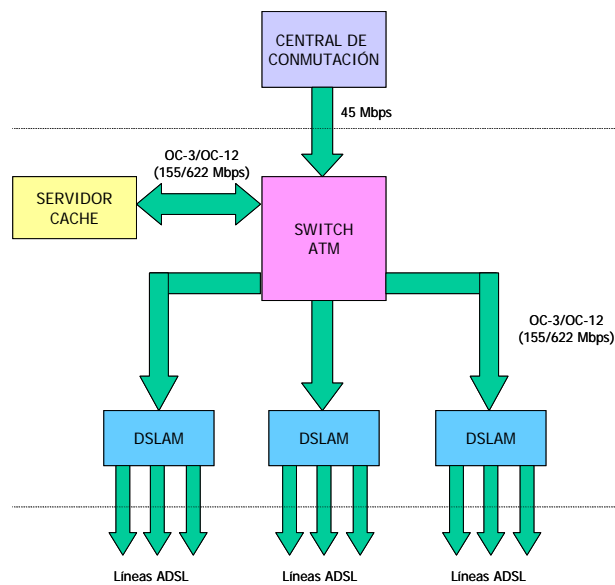


Figura 6. Arquitectura de servidores cache

2.2.2.3 Sistemas de acceso de ADSL

Los sistemas de acceso ADSL emplean básicamente dos tecnologías diferentes:

CAP (Carrierless Amplitude-Phase Modulation)

Esta tecnología se basa en la transmisión de una señal única modulada en amplitud y fase (con una técnica de modulación similar a QAM), que ocupa aproximadamente 1 MHz en el par de abonado.

DMT (Discrete Multi Tone)

Esta tecnología se desarrollo algo posterior a la tecnología CAP, debido a su mayor complejidad, se basa en la división del espectro en 256 bandas de 4 kHz de ancho de banda. Por cada una de estas bandas se transmite una portadora modulada en QAM, y el sistema es capaz de analizar la relación señal a ruido y respuesta de la línea en cada una de estas bandas, ajustando, en consecuencia, la velocidad de transmisión de cada una de las portadoras. El flujo de datos transmitido por el canal ADSL se divide entre las distintas portadoras de acuerdo con la velocidad de transmisión asignada a cada una, y se reconstruye luego en el extremo receptor de la misma manera. Ésta es la tecnología normalizada por la ITU, en su recomendación G922.1.

2.3 SISTEMA CLIENTE FINAL

También es llamada red residencial, hace referencia a todos los equipos que se

requieren dentro de la casa del usuario para recibir decodificar y visualizar las películas. Dentro de los equipos requeridos se encuentran una interfaz de red, un decodificador MPEG y un dispositivo visualizador. Puesto que la tecnología de acceso es ADSL, la interfaz de red corresponde a un modem que soporte los servicios de ADSL, es conocido como ATU-R (*ADSL Transceiver Unit Remote*), el decodificador está incluido en una caja de control llamada STB (*Set-Top Box*) y como dispositivo visualizador se tiene un televisor. En algunos casos se podría usar como dispositivo visualizador un monitor de computador, el cual requeriría en lugar de un STB, una tarjeta especial para la decodificación. La caja de control es en este sistema la parte fundamental para el envío y la recepción de las señales hacia y desde el servidor de VoD.

2.3.1 Caja de control (STB: *Set-Top Box*)

Existen varios tipos de cajas de control de acuerdo al servicio que soportan, entre estos están:

- ❑ Análogas: ejecutan las funciones de recibir, sintonizar y descifrar señales de televisión entrantes.
- ❑ De marcación: permiten a los usuarios acceder a los servicios de Internet desde el televisor.
- ❑ De nivel de entrada digital: son capaces de recibir difusión de televisión digital que es complementada con el sistema de pago por ver y unas herramientas muy básicas de navegación.

- Digital de rango medio: incluyen canal de retorno, lo cual proporciona comunicación con un servidor localizado en la cabecera de la red. Tiene el doble de capacidad de almacenamiento y procesamiento que los de nivel de entrada digital.
- Digitales avanzados: tienen la apariencia de un computador de escritorio, pueden ser usados para servicios tales como: video conferencia, Telefonía IP, gestión de redes desde el hogar, video bajo demanda y televisión por Internet de alta velocidad.

Los tipos de *Set-Top Box* más usados en aplicaciones de video bajo demanda son los digitales de rango medio y avanzados. Dentro de las funciones básicas que debe realizar un *Set-Top Box* están:

- Interfaz con la red de distribución local: corresponde básicamente al ATU-R (*ADSL Transceiver Unit Remote*), que puede estar incluido dentro de la caja de control o como dispositivo externo.
- Decodificación de la señal MPEG: MPEG es el estándar más comúnmente usado, proporciona una transmisión rápida de los flujos de vídeo con un gran compromiso en la calidad del mismo.
- Sincronización de las corrientes de audio y video: dentro de esta función se cuenta con un buffer usado para almacenar el vídeo antes de reproducirlo para

mantener una visualización continua y sin sobresaltos.

- ❑ Producción de una señal compuesta NTSC para el televisor

- ❑ Recepción de señal del control remoto: las señales a manejar en esta parte corresponden a las acciones permitidas al usuario como: retroceder, adelantar, pausar, entre otros.

- ❑ Manejo de la interfaz de usuario

2.3.2 Dispositivo visualizador

Se tiene dos opciones posibles para la visualización de las películas:

Televisor

La principal ventaja de este medio es la proliferación de los aparatos de televisión en la actualidad. Entre las desventajas están:

- ❑ Monitor con baja resolución, lo que lo hace inadecuado para material orientado a texto, como la *www*.
- ❑ Interfaz de usuario deficiente, el control remoto sólo permite seleccionar opciones de menús sencillos.
- ❑ *Set-Top Box* costoso, para el desempeño requerido

Computador personal

Para usar esta opción se requiere de una tarjeta especial y el *software* apropiado para decodificar y observar las películas. Entre las ventajas de esta opción están:

- ❑ Monitor no entrelazado de alta resolución.
- ❑ Interfaz de usuario sofisticada manejada por ratón.
- ❑ Fácil integración con la *www* y otras fuentes de información y entretenimiento orientada a computador.
- ❑ Opción más económica

Como desventajas se tienen:

- ❑ Los monitores son pequeños.
- ❑ Generalmente lo usa una persona a la vez.
- ❑ Se ubican en estudios en lugar de salas.
- ❑ Emiten menos luz que los televisores.

Una arquitectura posible de un *Set-Top Box* sencilla se muestra en la figura 7. El dispositivo consta de CPU, ROM, RAM, controlador E/S, decodificador MPEG e interfaz de red. Opcionalmente puede agregarse un chip de seguridad para el cifrado de películas [12].

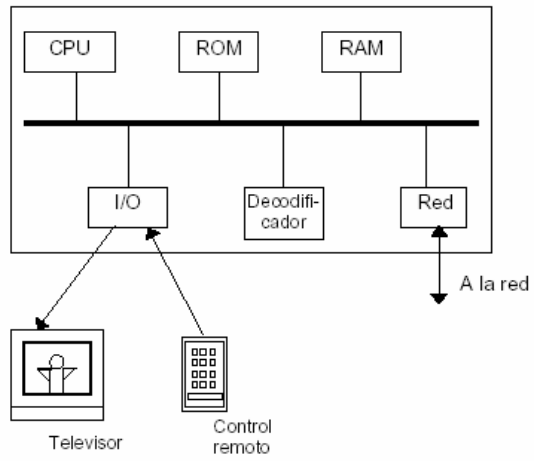


Figura 7. Arquitectura de hardware de un *Set-Top Box*⁸

⁸ Fuente: [12] TANENBAUM, Andrew S. Redes de Computadores. Tercera Edición. Prentice Hall. p. 755

3. MODELO DE REDES DE CONMUTACIÓN DE PAQUETES

En esta parte se expondrán algunos modelos matemáticos para las redes de conmutación de paquetes que permitirán, de acuerdo con sus parámetros de diseño, conducir su comportamiento hacia optimizaciones concretas. Para simplificar el modelo, en lugar de paquetes se supone la existencia de mensajes, cuya longitud (b) se modela mediante una variable aleatoria exponencial. En general, los resultados que se obtengan serán directamente extrapolables al caso de una red de conmutación de paquetes.

El punto de partida es una red de conmutación de mensajes. A cada nodo llegarán mensajes desde el exterior de la red; la tarea de la red será cursarlos, es decir, hacerlos llegar a su destino; origen y destino serán nodos de la red, surgiendo así los conceptos de nodo origen y nodo destino. Se modela la llegada de mensajes exteriores con un determinado par origen - destino como procesos de *Poisson*. Los mensajes pasarán por nodos intermedios en su camino hacia el destino. Se asume que la red dispone de un algoritmo de encaminamiento fijo, es decir, que utilizará siempre una misma ruta entre cada par de nodos. Como los nodos pueden estar interconectados con otros nodos, y además puede existir multiplexación en los canales, estos centros de conmutación pueden recibir y procesar varios mensajes

concurrentemente. Cuando un mensaje llega a un nodo provenga de donde provenga, el nodo lo procesa (deduce por dónde tiene que reenviarlo) idealmente en tiempo cero, y entonces lo mete en la cola de salida correspondiente al enlace por el que va a salir el mensaje. En un nodo hay tantas colas como posibles canales de salida. La capacidad del servidor coincide con la capacidad del enlace de salida del nodo. A este procedimiento se le denomina almacenamiento y reenvío en los nodos.

3.1 PARÁMETROS DE MODELACIÓN

Los parámetros que modelan el comportamiento de la red que se ha descrito son los siguientes:

N: Número de nodos de la red. Se supone que están etiquetados desde 1 hasta N.

M: Número de canales de la red. Se entiende que estos canales corresponden a enlaces simplex; de lo contrario cada enlace dúplex se contaría como dos canales. Se suponen etiquetados desde 1 hasta M. Se dice que se conoce la topología de la red si se conoce el número de nodos y su localización, así como el número de canales que unen los nodos entre sí.

C: Capacidad total, es decir, valor máximo de la velocidad de transmisión de bits para toda la red, medida en bits por segundo (bps).

$\lambda^{(lk)}$: Tráfico enviado del nodo l (origen) al nodo k (destino), expresado en mensajes/segundo. Este valor se encuentra en la posición (l,k) de la matriz de tráfico de la red.

$\lambda^{(l)}$: Tráfico que ingresa a la red por el nodo l, expresado en mensajes/segundo. Es generado por las estaciones que tienen entrada por el nodo l. Se determina como:

$$\lambda^{(l)} = \sum_{k=1}^N \lambda^{(lk)}$$

$\lambda^{(k)}$: Tráfico que sale de la red por el nodo k, expresado en mensajes/segundo. Se determina como:

$$\lambda^{(k)} = \sum_{l=1}^N \lambda^{(lk)}$$

γ : Tráfico que ingresa a la red por todos los nodos. Se da en mensajes/segundo. También se conoce como tráfico total, tráfico total a cursar o tráfico total ofrecido a la red. Será igual a:

$$\gamma = \sum_{l=1}^N \lambda^{(l)}$$

λ_{ij} : Tráfico que atraviesa el enlace ij, es decir la cantidad de mensajes/segundo enviados del nodo l al nodo k que utilizan el enlace ij. Se determina como:

$$\lambda_{ij} = \sum \lambda_{ij}^{(lk)}$$

λ : Tráfico total que atraviesa todos los enlaces, corresponde a la suma de los tráficos que atraviesan cada uno de los enlaces, en mensajes/segundo. Se llama también flujo total de mensajes o tráfico interno total. Este tráfico es mayor o igual que el tráfico total que ingresa a la red, γ , ya que va a incluir varias veces el tráfico que va de un nodo a otro, si para llegar al destino requiere de varios enlaces. Se determina como:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$$

n : Número esperado de saltos que da un mensaje desde el nodo origen hasta el nodo destino. Este valor es mayor cuanto mayor sea λ de γ . Se define como:

$$n = \frac{\lambda}{\gamma}$$

$\frac{1}{\mu}$: Longitud promedio del mensaje que pasa por el enlace ij . Esta longitud se calcula como un valor esperado de todas las longitudes de los mensajes que transitan por el enlace ij . Está medida en bits/segundo

ρ : Factor de utilización de toda la red o llamada también parámetro de intensidad de tráfico, definido como:

$$\rho = \frac{\lambda}{C} \frac{1}{\mu}$$

E(T_{ij}): Tiempo esperado de retardo por cada enlace ij. Se determina como:

$$E(T_{ij}) = \frac{1}{\mu_{ij}C_{ij} - \lambda_{ij}}$$

E[n_{ij}]: Longitud de la cola que alimenta el enlace ij. Se debe tener en cuenta que esta cola incluye el mensaje que se encuentra en transmisión debido a que este permanece copiado en el buffer mientras se introduce en el canal. Está dado por la expresión para colas M/M/1

$$E[n_{ij}] = \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij}C_{ij} - \lambda_{ij}}$$

E[n]: Longitud total de todas las colas que se forman en los diferentes nodos. También se interpreta como el número total de mensajes que están en la red. Se puede medir en cualquier unidad, es decir, puede estar en mensajes, bits, etc. Está dada por:

$$E[n] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij}C_{ij} - \lambda_{ij}}$$

E[T]: Tiempo esperado de retardo en toda la red. Se determina utilizando las fórmulas de Little's. Es la longitud total de las colas dividido entre la tráfico total en mensajes/segundo que ingresan a la red.

$$E[T] = \frac{E[n]}{\lambda}$$

C_{ij}: Capacidad del enlace ij medida en bps. Esta se puede asignar de manera óptima, proporcional, ecualizada y discreta. La asignación óptima de la capacidad para el enlace se determina como:

$$C_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij}} + \left(C - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij}} \right) \frac{\sqrt{\lambda_{ij}}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sqrt{\lambda_{ij}}}$$

En el desarrollo de este trabajo, se asume que la longitud de los mensajes en todos los enlaces es constante y se representa como $1/\mu$, por lo tanto la expresión para determinar la capacidad óptima se reduce a:

$$C_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu} + \left[C - \frac{\lambda}{\mu} \right] \frac{\sqrt{\lambda_{ij}}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sqrt{\lambda_{ij}}}$$

Esta es la expresión que se reemplaza en el tiempo de retardo para obtener el mínimo en toda la red y en los enlaces.

3.2 PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

La optimización del comportamiento de la red que se está considerando, se reduce a evaluar cuanta capacidad se debe asignar a cada uno de los enlaces de tal manera que el retardo global de la red sea mínimo, para esto se requiere ajustar los valores de algunos parámetros de la red y otros son simplemente fijos y se deben adaptar al diseño sin modificarlos. Los parámetros usados en la selección de los criterios de

optimización del comportamiento de la red se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Parámetros fijos: son aquellos que no se pueden modificar, en este caso están: longitud del mensaje ($1/\mu$) y topología de la red.
- Parámetro a optimizar: es el retardo global de la red, en el sentido de minimizarlo.
- Parámetros de diseño: son los que se modifican para lograr la optimización, en este caso el parámetro diseño corresponde a la capacidad de los enlaces.

3.3 TOPOLOGÍAS DE RED QUE FAVORECEN RETARDOS BAJOS

A partir de análisis se ha observado que para tener unos valores de retardo bajos, se requiere:

- Número de saltos promedio bajo: cuantos menos saltos tengan que dar los paquetes, menor será el retardo promedio.
- Número de enlaces bajo y con gran capacidad

Entre las topologías que minimizan uno de estos parámetros están las de malla y anillo y entre las topologías que mantienen bajos ambos parámetros está la de estrella.

3.3.1 Número de saltos promedio bajo

Las topologías que favorecen el mínimo número de saltos promedio son las de alta conectividad, es decir, aquellas que tienden a conectar los nodos con todos los demás. El ejemplo extremo es la estructura en malla, como la que se muestra en la figura 8, donde el número promedio de saltos es 1. El inconveniente de estas topologías es que requieren una inversión elevada, aunque sólo sea por la necesidad de cablear todos los nodos entre sí, con los consiguientes costos de obra civil, materiales, etc.

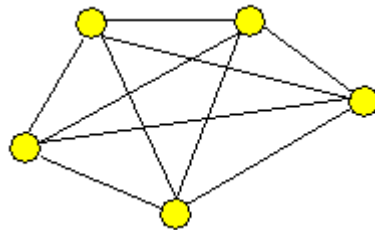


Figura 8. Estructura de red en malla

3.3.2 Número de enlaces bajo

El caso extremo sería que todo el flujo viajara por un canal y los demás no llevaran información; en este caso la suma sería 1. Sin embargo, esta red serviría de poco, de ahí que una solución más razonable consiste en concentrar el tráfico en un número de enlaces reducido, y de gran capacidad.

Las estructuras de red que favorecen el mínimo número de enlaces son las

topologías en anillo, mostrada en la figura 9, donde se cumple que el número de enlaces (unidireccionales) es igual que el número de nodos.

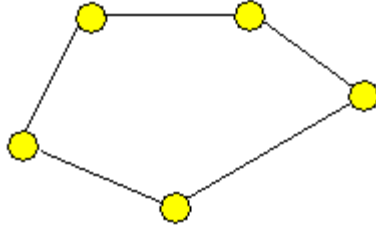


Figura 9. Estructura de red en anillo

El inconveniente de esta topología es que el número promedio de saltos tiende a $N/2$, contradiciendo el caso anterior (que requería número medio de saltos bajo).

La topología de red que favorece un mínimo número de enlaces y de saltos es la topología de red en estrella, mostrada en la figura 10, en la que se cumplen:

- Número de enlaces $M = 2 (N - 1)$
- Número de saltos promedio tiende a 2, o incluso a 1 si el nodo central es un centro de proceso que recibe mucho tráfico de los otros nodos.

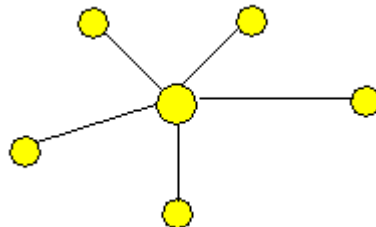


Figura 10. Estructura de red en estrella

En la práctica se llega a un compromiso: se empieza con una topología de red suficiente para las necesidades de ese momento, y se va mallando en función del factor de utilización de los enlaces, y de las necesidades cambiantes de los usuarios.

En redes profesionales conviene habilitar rutas alternativas que protejan frente a:

- ❑ Caída de rutas principales.
- ❑ Saturación de rutas principales.

Se ha supuesto como conocido el tráfico que ingresa a la red, pero en realidad éste es un parámetro no sólo desconocido, sino también variable, aunque sí estimable. Por eso se toman precauciones y se deben sobredimensionar los canales y además de instalar más enlaces de los estrictamente necesarios, con el objeto de hacer frente a posibles picos de tráfico. Además, desde la solicitud de un determinado servicio a un proveedor (por ejemplo, el aumento de capacidad de un enlace) hasta la disponibilidad del mismo transcurre un tiempo en el que la red ha de seguir en funcionamiento. Si se dispone de enlaces alternativos que hagan frente a estas contingencias, la red puede seguir funcionando hasta proveer una mejor solución.

4. RESULTADOS DEL DISEÑO

Definición de usuarios potenciales

Los usuarios potenciales son una porción de los abonados potenciales por zonas, estos a su vez corresponden al número de usuarios en estratos residenciales medio-altos, es decir los estratos 4, 5 y 6 que podrían adquirir el servicio de vídeo por demanda (VoD) dada su condición económica. Los abonados potenciales por zonas se presentan en la siguiente tabla:

ZONA	ESTRATO 4	ESTRATO 5	ESTRATO 6	ABONADOS
A	865	215	48	1128
B	290	360	143	793
C	280	0	0	280
D	0	0	0	0
E	720	0	0	720
F	200	0	0	200
G	430	108	25	563
H	245	18	0	263
I	215	145	72	432
J	280	0	0	280
K	0	0	93	93
TOTAL	3525	846	381	4752

Tabla 1. Abonados potenciales

La cantidad de usuarios por cada estrato que adquieren de manera segura el

servicio de vídeo por demanda (VoD), se restringe al número de usuarios en cada estrato que solicitaría el servicio, así: 20%, 40% y 60% para los estratos 4, 5 y 6 respectivamente, es decir no se realiza el diseño para el 100% de los abonados potenciales. Los usuarios potenciales se muestran en siguiente tabla:

ZONA	ESTRATO 4	ESTRATO 5	ESTRATO 6	USUARIOS
A	173	86	29	288
B	58	144	86	288
C	56	0	0	56
D	0	0	0	0
E	144	0	0	144
F	40	0	0	40
G	86	43	15	144
H	49	7	0	56
I	43	58	43	144
J	56	0	0	56
K	0	0	56	56
TOTAL	705	338	229	1272

Tabla 2. Usuarios potenciales

Ubicación de los servidores

Se usan dos tipos de servidores de video: principal y local, el servidor principal es el núcleo del servicio de vídeo bajo demanda (VoD), debe tener alta capacidad de almacenamiento pues contiene la totalidad de vídeos disponibles, además debe permitir acceso simultáneo a múltiples usuarios, gestionar la conexión con otros servidores y administrar las actividades de usuario; se ubica en el nodo D donde aunque no hay usuarios potenciales, es el nodo que por ubicación geográfica presenta las distancias más cortas con la mayoría de nodos, de manera que se

facilita el acceso y descongestiona otros enlaces de la red. El servidor local, es un servidor vídeo de menor capacidad, almacena los vídeos más recientes y / o más populares. Se ubica un servidor local en cada nodo con mayor cantidad de usuarios, es decir en los nodos A, B, E e I. Se presenta una excepción con la ubicación de un servidor local en el nodo H, que no tiene gran cantidad de usuarios, pero que por su ubicación geográfica permite descongestionar los enlaces principales. El objeto de colocar servidores locales cerca de los usuarios es ahorrar ancho de banda durante las horas de mayor tráfico de la red.

Todos los usuarios de las zonas podrán acceder al servicio conectándose a cualquiera de estos servidores dependiendo de varios factores como son el tráfico de la red, disponibilidad de películas en cada servidor y esquemas de contingencia por falla de los enlaces. El acceso simultáneo de usuarios hacia los servidores se restringe al 60% de los usuarios potenciales por zona. La siguiente tabla muestra la cantidad de usuarios que podrán tener acceso simultáneo y la ubicación de servidores de vídeo por nodos:

NODO	USUARIOS	SERVIDOR
A	173	LOCAL
B	173	LOCAL
C	34	NINGUNO
D	0	PRINCIPAL
E	86	LOCAL
F	24	NINGUNO
G	86	NINGUNO
H	34	LOCAL
I	86	LOCAL
J	34	NINGUNO
K	34	NINGUNO

Tabla 3. Ubicación de servidores

Distribución de rutas de acceso

Para minimizar el congestionamiento en los enlaces de la red de transporte se debe distribuir y flexibilizar el tráfico interconectando los servidores de vídeo y respetando las siguientes acciones:

- ❑ El 100% de los usuarios conectados al nodo principal accesan los vídeos únicamente del servidor principal.
- ❑ El 80% de los usuarios de nodos con servidores locales pueden accesar los vídeos localizados en el servidor de su propio nodo y el 20% pueden tener acceso a los vídeos en el servidor principal.
- ❑ El acceso de los usuarios conectados a nodos que no poseen servidor principal ni servidor local se distribuye de la siguiente forma: el 80% de los usuarios pueden accesar los vídeos del servidor local más cercano, el 20% accesan los vídeos del servidor principal. Previendo fallas, se proporciona una ruta de contingencia hacia otro servidor local para el 80% de los usuarios, se busca que el servidor local se encuentre en el nodo geográficamente más cercano.

En la siguiente tabla se presentan los resultados al aplicar los porcentajes descritos anteriormente para los usuarios potenciales por nodos, las rutas se indican usando las letras minúsculas del nodo origen y el nodo fuente.

NODO ORIGEN	USUARIOS DE DISEÑO	RUTA	NODO SERVIDOR	USUARIOS POR RUTA
A	173	aa	A	138
		ad	D	35
B	173	bb	B	138
		bd	D	35
C	34	ca	A	27
		cd	D	7
		cb	B	27
D	0	dd	D	0
E	86	ee	E	69
		ed	D	17
F	24	fe	E	19
		fd	D	5
		fi	I	19
G	86	gi	I	69
		gd	D	17
		gh	H	69
H	34	hh	H	27
		hd	D	7
I	86	ii	I	69
		id	D	17
J	34	ji	I	27
		jd	D	7
		jh	H	27
K	34	ki	I	27
		kd	D	7
		kh	H	27

Tabla 4. Usuarios por ruta de acceso

La distribución de las rutas y de los servidores por nodos, se presenta gráficamente en la siguiente figura, las líneas a trazos corresponden a las rutas de contingencia. Es importante aclarar que la ruta no siempre coincide con un enlace físico entre nodos, muchas de las rutas atraviesan un mismo nodo, esto no se aprecia en la gráfica sólo se podrá apreciar en el cálculo del tráfico por enlace.

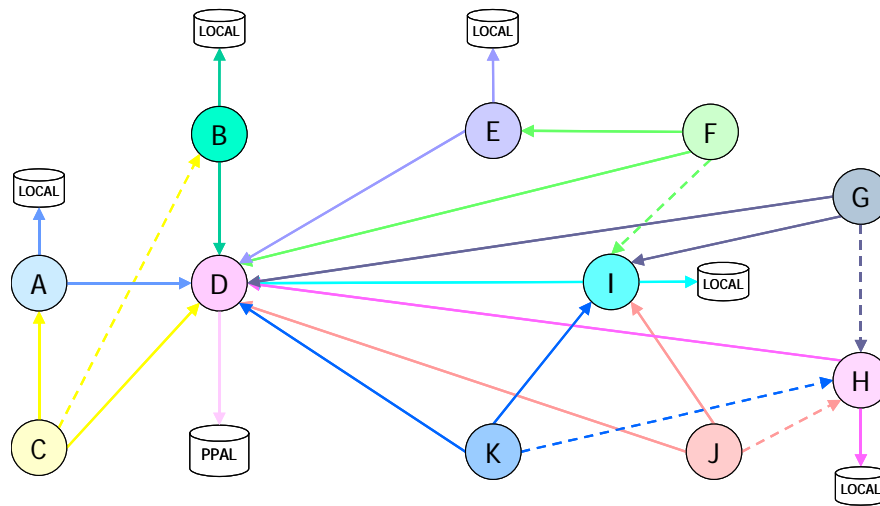


Figura 11. Distribución de rutas y servidores

Determinación del tráfico de un nodo fuente a un nodo destino

Para asignar el tráfico que se genera de un nodo fuente a un nodo destino, es decir por cada ruta, se tiene en cuenta el número de usuarios que podrían acceder simultáneamente el nodo destino, la longitud de los mensajes enviados y la tecnología de acceso. Para aplicaciones de video bajo demanda que envían la información sobre ATM a velocidad constante y formato de compresión MPEG-2, se recomienda transportar paquetes o celdas de longitud fija cada uno de 188 bytes, de esta forma se puede obtener una baja variación de retardo que se traduce en alta calidad de la señal de vídeo. Para asignar las velocidades a las que se puede aspirar durante una solicitud y una respuesta, se tiene en cuenta que la tecnología de acceso es ADSL, así se destina una velocidad de bajada de 6,4 Mbps que

corresponde típicamente a 6 Mbps para aplicaciones de VoD más 400 kbps para el servicio de Internet y una velocidad de subida de 128 kbps que se encuentra dentro de las velocidades permitidas de ADSL.

Para propósitos de análisis a las celdas ATM se les denomina simplemente mensajes. A continuación se presenta como ejemplo el cálculo del tráfico en mensajes por segundo entre los nodos A y C para indicar la manera como se determinó el tráfico para todas las rutas. Es importante distinguir si los nodos poseen servidores, pues esto afecta directamente el tráfico. Como se usa la tecnología ADSL, la velocidad cuando se realiza una petición es diferente a la que se requiere cuando se está recibiendo la información. En este caso el nodo A posee un servidor local y el nodo C no tiene servidor, por lo tanto se debe asignar la velocidad de bajada de 6,4 Mbps. El tráfico en mensajes por segundo entre los nodos A y C es entonces:

$$\lambda_{ac} = \frac{\text{Velocidad de bajada} * \text{Número de usuarios por ruta}}{\text{longitud del mensaje}}$$
$$\lambda_{ac} = \frac{6,4 \text{ Mbits / s} * 27}{188 * 8 * 1e^{-6} \text{ Mbits / mensajes}}$$
$$\lambda_{ac} = 115027 \text{ mensajes / s}$$

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para cada una de las rutas al seguir el procedimiento mostrado. Se observa claramente que el tráfico de una ruta no es simétrico, es decir depende de si el nodo se comporta como fuente o destino y si posee o no un servidor, pues si no posee servidor no puede generar tráfico que incluya una velocidad de bajada. Para el caso expuesto, cuando el nodo

origen es A y el nodo destino es C se genera un tráfico de descarga de 115027 mensajes/s y cuando el nodo origen es C y el nodo destino A se genera un tráfico de solicitud de 1995 mensajes/s.

F\D	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	$\lambda(I)$
A	0	0	115027	2660	0	0	0	0	0	0	0	117687
B	0	0	115027	2660	0	0	0	0	0	0	0	117687
C	1995	1995	0	665	0	0	0	0	0	0	0	4655
D	148936	148936	29920	0	72473	21277	72473	29920	72473	29920	29920	656248
E	0	0	0	1330	0	81117	0	0	0	0	0	82447
F	0	0	0	665	1330	0	0	0	1330	0	0	3325
G	0	0	0	1330	0	0	0	5984	5984	0	0	13298
H	0	0	0	665	0	0	293883	0	0	115027	115027	524602
I	0	0	0	1330	0	81117	293883	0	0	115027	115027	606384
J	0	0	0	665	0	0	0	1995	1995	0	0	4655
K	0	0	0	665	0	0	0	1995	1995	0	0	4655
$\lambda(k)$	150931	150931	259974	12635	73803	183511	660239	39894	83777	259974	259974	2135643

Tabla 5. Matriz de tráfico que ingresa a la red

Cálculo de tráfico por enlaces

En el cálculo de tráfico por enlaces se tiene en cuenta la topología de la red y los tráficos de las rutas que lo atraviesen. De nuevo, es importante establecer el sentido en el cual se determina el tráfico, es decir identificar cuál es el nodo destino, cuál es el nodo fuente y si poseen o no servidores. Para el caso del punto anterior, la ruta **ac** coincide con un enlace físico entre los nodos A y C, sin embargo el tráfico del enlace no es solamente el que se determinó, es necesario adicionar los tráficos que se generan desde los nodos B y D hacia el nodo C, pues por no tener una conexión directa deben enviar la información a través del nodo A y por lo tanto usarán el enlace existente entre los nodos A y C, el resultado de este cálculo es:

$$\lambda_{AC} = \lambda_{ac} + \lambda_{bc} + \lambda_{dc}$$

$$\lambda_{AC} = (115027 + 115027 + 29920)\text{mensajes / s}$$

$$\lambda_{AC} = 259974\text{mensajes / s}$$

A continuación se presentan los saltos que debe dar el tráfico de una ruta cuando no existe un enlace físico entre los nodos que la definen, los casos más frecuentes son los de los nodos que se encuentran conectados directamente al nodo I, entonces se tiene:

- ❑ Ruta cd: parte del nodo C, pasa a través del nodo A para llegar al nodo D
- ❑ Ruta cb: parte del nodo C pasa a través de los nodos A-D para llegar al nodo B
- ❑ Ruta ed: parte del nodo E, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta fe: parte del nodo F, pasa a través del nodo I para llegar al nodo E
- ❑ Ruta fd: parte del nodo F, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta gd: parte del nodo G, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta gh: parte del nodo G, pasa a través del nodo I para llegar al nodo H
- ❑ Ruta hd: parte del nodo H, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta jd: parte del nodo J, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta jh: parte del nodo J, pasa a través del nodo I para llegar al nodo H
- ❑ Ruta kd: parte del nodo K, pasa a través del nodo I para llegar al nodo D
- ❑ Ruta kh: parte del nodo K, pasa a través del nodo I para llegar al nodo H

La siguiente tabla muestra el tráfico por enlace para todos los casos. Como en el apartado anterior, la matriz de tráfico por enlace no es simétrica y solo aparece el

cálculo de acuerdo a la topología de las red, es decir los ceros representan que no hay enlace físico entre un par de nodos dado.

F\D	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	λ_{ij}
A	0	0	259974	5320	0	0	0	0	0	0	0	265294
B	0	0	0	4655	0	0	0	0	0	0	0	4655
C	4655	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4655
D	293883	263963	0	0	0	0	0	0	328456	0	0	886302
E	0	0	0	0	0	0	0	0	2660	0	0	2660
F	0	0	0	0	0	0	0	0	3325	0	0	3325
G	0	0	0	0	0	0	0	0	13298	0	0	13298
H	0	0	0	0	0	0	0	0	10639	0	0	10639
I	0	0	0	6650	230053	183511	660239	553857	0	259974	259974	2154258
J	0	0	0	0	0	0	0	0	4655	0	0	4655
K	0	0	0	0	0	0	0	0	4655	0	0	4655
λ_{ij}	298538	263963	259974	16625	230053	183511	660239	553857	367688	259974	259974	3354396

Tabla 6. Matriz de tráfico por enlace

Cálculo de número esperado de saltos y el factor de utilización

La determinación del número esperado de saltos que da un mensaje desde un nodo origen hasta un nodo destino, sugiere el tipo de topología de la red. Si el número de saltos es $N/2$, donde N es el número de nodos, sugiere una red en anillo, si tiende a dos o incluso a uno, se dice que la red es en estrella y si es uno se tiene una red en malla. Para el cálculo de este parámetro se requiere conocer el tráfico total de la red (λ), el cual se obtiene de la matriz de tráfico por enlace (Tabla 6) y el total del tráfico que ingresa a la red (γ), que corresponde a la suma del tráfico que ingresa a la red (Tabla 5), entonces se tiene:

$$n = \frac{\lambda}{\gamma}$$

$$n = \frac{3354396}{2135643}$$

$$n = 1,57$$

Este resultado sugiere que la topología en este diseño tiende a ser estrella, pero como se puede apreciar en la figura 1, no lo es completamente, por lo que se hace referencia simplemente como red distribuida.

El factor de utilización permite evaluar en cierta forma qué porcentaje de la red está siendo utilizado. Un factor de cero indica que la utilización es nula y un factor de 1 corresponde a una utilización máxima. Este factor depende del tráfico total de la red (λ), la longitud del mensaje ($1/\mu$) y de la capacidad total asignada a la red (10000 Mbps).

$$\rho = \frac{\lambda \frac{1}{\mu}}{C}$$
$$\rho = \frac{3354396 * 0,001504}{10000}$$
$$\rho = 0,504$$

El valor obtenido para el factor de utilización muestra que aproximadamente la mitad de la capacidad total disponible está siendo utilizada, lo cual resulta apropiado para lograr retardos y longitudes de colas pequeños tanto en cada enlace como en la red.

Cálculo de la capacidad para cada enlace

La capacidad para cada enlace puede asignarse de manera óptima, proporcional, ecualizada y discreta. La asignación óptima es la que más se acerca a los requerimientos reales, la asignación proporcional permite realizar una buena y sencilla estimación de la capacidad óptima requerida en cada enlace. La asignación

ecualizada en algunos casos puede no ser suficiente para los requerimientos. La asignación discreta se realiza usando las capacidades de la Jerarquía Digital Sincrónica (SDH: *Synchronous Digital Hierarchy*), específicamente se tuvo en cuenta los modos: STM-1 cuya capacidad es de 155 Mbps, STM-4 de 622 Mbps y STM-16 de 2,5 Gbps y se sugiere seguir el siguiente algoritmo, mostrado en forma de diagrama de flujo, para determinar la capacidad discreta más cercana a la óptima:

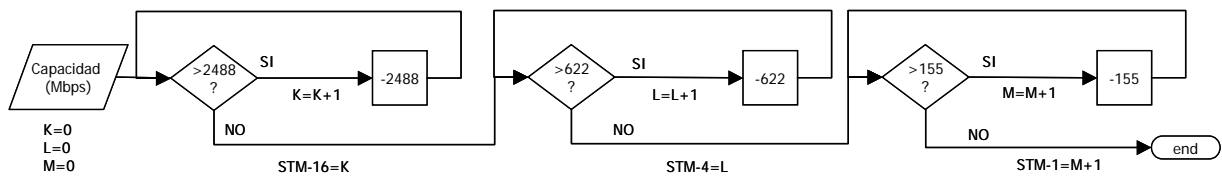


Figura 12. Algoritmo para calcular el número de STM-N

A continuación se sigue con el caso del enlace entre los nodos A y C, y se determina la capacidad del enlace usando los cuatro tipos de asignación. Para el desarrollo de estos cálculos se requiere conocer:

- Capacidad total asignada para todos los enlaces ($C = 10000$ Mbps),
- Tráfico del enlace ($\lambda_{AC} = 259974$ mensajes/s)
- Longitud de mensaje ($1/\mu = 188 \cdot 8 \cdot 1e^{-6} = 0,001504$ Mbits/mensaje)
- Número de enlaces entre los nodos ($M_{AC} = 1$) y el número total de enlaces ($M = 20$ enlaces)
- Tráfico total de la red ($\lambda = 3354396$ mensajes/s)

- Suma de las raíces del tráfico de los enlaces⁹ ($\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sqrt{\lambda_{ij}} = 6379$)

Capacidad óptima

$$(C_{AC})_{opt} = \frac{\lambda_{AC}}{\mu} + \left[C - \frac{\lambda}{\mu} \right] \frac{\sqrt{\lambda_{AC}}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sqrt{\lambda_{ij}}}$$

$$(C_{AC})_{opt} = 259974 * 0,001504 + [10000 - 3354396 * 0,001504] \frac{510}{6379}$$

$$(C_{AC})_{opt} = 787 \text{ Mbps}$$

Capacidad proporcional

$$(C_{AC})_{prop} = C \frac{\lambda_{AC}}{\lambda}$$

$$(C_{AC})_{prop} = 10000 \frac{259974}{3354396}$$

$$(C_{AC})_{prop} = 775 \text{ Mbps}$$

Capacidad ecualizada

$$(C_{AC})_{eq} = C \frac{M_{AC}}{M}$$

$$(C_{AC})_{eq} = 10000 \frac{1}{20}$$

$$(C_{AC})_{eq} = 500 \text{ Mbps}$$

Capacidad discreta

$$(C_{AC})_{disc} = \text{un STM-1 y un STM-4}$$

$$(C_{AC})_{disc} = 155 \text{ Mbps} + 622 \text{ Mbps}$$

$$(C_{AC})_{disc} = 777 \text{ Mbps}$$

⁹ Ver anexo: Raíz cuadrada de la matriz de tráfico por enlace

Como puede observarse para las capacidades óptima y proporcional se obtuvieron resultados muy similares. Para la capacidad discreta se seleccionaron los valores de STM-N, según el algoritmo sugerido en la figura 12, aunque también se puede usar un algoritmo más sencillo como el que se muestra en la figura 13, de manera que se lograra un valor muy cercano al de la capacidad óptima, en este caso está un poco por debajo. La capacidad obtenida mediante asignación ecualizada está muy por debajo de la óptima, lo cual es un indicio de que este tipo de asignación no es la referencia más adecuada de los requerimientos para la capacidad del enlace.

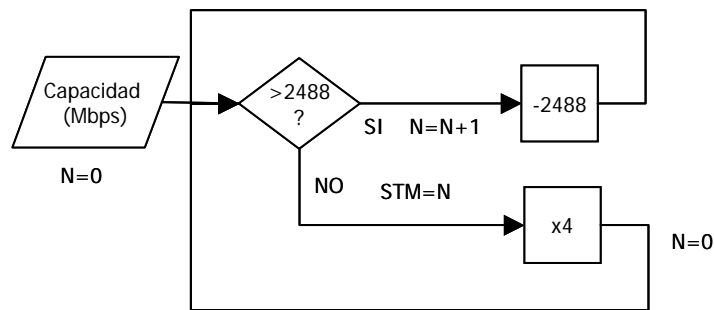


Figura 13. Algoritmo simplificado para calcular el número de STM-N

Estimación del retardo en cada enlace

Los retardos para cada enlace se determinan usando las capacidades para cada enlace, el tráfico por enlace (λ_{ij}) y la longitud del mensaje ($1/\mu$). De la misma forma podría mostrarse la manera como se determina el retardo de acuerdo al tipo de asignación de la capacidad para el enlace, es decir, óptimo, proporcional, ecualizado

y discreto, sin embargo, debido a que el tiempo de retardo mínimo se obtiene al usar en el cálculo la capacidad obtenida mediante asignación óptima, sólo se presenta esta estimación. Usando nuevamente el ejemplo del enlace entre los nodos A y C, se tiene:

$$E(T_{AC})_{opt} = \frac{1}{\mu C_{AC} - \lambda_{AC}}$$

$$E(T_{AC})_{opt} = \frac{1}{\frac{787}{0,001504} - 259974}$$

$$E(T_{AC})_{opt} = 3,8 \mu s$$

En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para las asignaciones óptima, proporcional, ecualizada y discreta, tanto para las capacidades en Mbps como para los tiempos de retardo en μs de cada uno de los enlaces, además del tráfico por enlace en mensajes/s. Al final de las columnas de capacidades se puede apreciar la capacidad total de la red, la cual corresponde a la suma de las capacidades de todos los enlaces y no sobrepasa los 10000 Mbps asignados. En la práctica ésta asignación depende del presupuesto disponible de la empresa, pues entre mayor capacidad se requiera por enlace mayor será el costo. Esto se debe a que el medio de transmisión debe ser capaz de soportar esa capacidad, por ejemplo para las capacidades que se obtuvieron, el medio que más se ajusta a los requerimientos es la fibra óptica, la cual tiene un costo más elevado que el par trenzado. Para el caso de la capacidad total discreta, se obtuvo un poco más que la capacidad total asignada, esto es debido a que se tomaron múltiplos enteros de STM-1 y STM-4 y en algunos enlaces resultó una capacidad algo mayor de la que se obtuvo mediante la asignación óptima.

En la tabla se puede apreciar que para los enlaces IG e IH, los retardos estimados usando la capacidad ecualizada en cada caso dan un resultado negativo, este signo indica que las capacidades asignadas de forma ecualizada para los enlaces no es suficiente, es decir están muy por debajo de los requerimientos mínimos (capacidades óptimas).

ENLACE ij	Tráfico	Cij ópt	Cij prop	Cij eq	Cij disc	E(Tij)ópt	E(Tij)prop	E(Tij)eq	E(Tij)disc
AD	5320	65	16	500	155	26,39	188,03	3,06	10,23
AC	259974	787	775	500	777	3,80	3,92	13,80	3,90
BD	4655	60	14	500	155	28,38	214,89	3,05	10,16
CA	4655	60	14	500	155	28,38	214,89	3,05	10,16
DA	293883	863	876	500	932	3,57	3,47	25,93	3,07
DB	263963	796	787	500	777	3,77	3,86	14,60	3,96
DI	328456	939	979	500	932	3,38	3,10	250,58	3,43
EI	2660	44	8	500	155	37,60	376,06	3,03	9,96
FI	3325	50	10	500	155	33,42	300,85	3,04	10,03
GI	13298	110	40	500	155	16,71	75,20	3,13	11,14
HI	10639	96	32	500	155	18,80	94,01	3,11	10,82
ID	6650	73	20	500	155	23,87	150,42	3,07	10,37
IE	230053	719	686	500	777	4,03	4,42	9,77	3,49
IF	183511	609	547	500	777	4,52	5,55	6,71	3,00
IG	660239	1624	1968	500	1709	2,38	1,54	-3,05	2,10
IH	553857	1411	1651	500	1554	2,60	1,84	-4,52	2,09
IJ	259974	787	775	500	777	3,80	3,92	13,80	3,90
IK	259974	787	775	500	777	3,80	3,92	13,80	3,90
JI	4655	60	14	500	155	28,38	214,89	3,05	10,16
KI	4655	60	14	500	155	28,38	214,89	3,05	10,16
	3354396	10000	10001	10000	11339				

Tabla 7. Capacidad y retardo para cada enlace

Para determinar el retardo total de la red no se puede realizar la suma de los tiempos de retardo en cada uno de los enlaces sino que se debe calcular el

promedio ponderado de los tiempos de retardo en cada uno de los enlaces. Para determinar el promedio ponderado se calcula la longitud promedio de la cola de cada uno de los enlaces ($E[n_{ij}]$) y luego se suman para obtener la longitud total promedio del número de mensajes en la red ($E[n]$). Finalmente el retardo total de la red ($E[T]$) se determina usando la fórmula de *Little's* y es igual a la longitud total de las colas dividido entre el tráfico total de la red en mensajes/s (λ).

A continuación se realiza el cálculo para el enlace entre los nodos A y C, se usan los datos que se dieron en los apartados anteriores:

$$E[n_{AC}]_{opt} = \frac{\lambda_{AC}}{\mu C_{AC} - \lambda_{AC}}$$

$$E[n_{AC}]_{opt} = \frac{259974}{\frac{787}{0,001504} - 259974}$$

$$E[n_{AC}]_{opt} = 0,98$$

En la tabla 8 se presentan los resultados que se obtuvieron al realizar el mismo proceso para cada uno de los enlaces, de acuerdo nuevamente a las asignaciones óptimas, proporcionales, ecualizadas y discretas para las capacidades.

En la determinación del tiempo esperado de retardo en toda la red se necesita la longitud total de las colas, como la mejor evaluación se tiene cuando la asignación es óptima, de la tabla 8 se toma la suma de las longitudes de colas óptimas que corresponde a $E[n] = 12,35$ y se calcula como sigue:

$$E[T] = \frac{E[n]}{\lambda}$$

$$E[T] = \frac{12,35}{3354396}$$

$$E[T] = 3,68 \mu s$$

ENLACE ij	E[nij] ópt	E[nij] prop	E[nij] eq	E[nij]disc
AD	0,140	1,000	0,016	0,054
AC	0,987	1,018	3,587	1,013
BD	0,132	1,000	0,014	0,047
CA	0,132	1,000	0,014	0,047
DA	1,050	1,018	7,621	0,902
DB	0,995	1,018	3,854	1,045
DI	1,110	1,019	82,303	1,128
EI	0,100	1,000	0,008	0,026
FI	0,111	1,000	0,010	0,033
GI	0,225	1,000	0,042	0,148
HI	0,200	1,000	0,033	0,115
ID	0,156	1,000	0,020	0,069
IE	0,928	1,018	2,247	0,803
IF	0,831	1,018	1,232	0,551
IG	1,571	1,018	-2,014	1,387
IH	1,441	1,018	-2,501	1,155
IJ	0,987	1,018	3,587	1,013
IK	0,987	1,018	3,587	1,013
JI	0,132	1,000	0,014	0,047
KI	0,132	1,000	0,014	0,047
	12,349	20,185	103,689	10,645

Tabla 8. Longitud de la cola en cada enlace

Como puede verse se sigue propagando el error de haber asignado una capacidad ecualizada muy por debajo de la requerida en los enlaces IG e IH, pues se siguen obteniendo valores negativos.

CONCLUSIONES

- Durante el análisis del tráfico surgió la necesidad de limitar la capacidad total de la red a fin de evitar que el enlace entre los nodos D e I, obligatorio para la mayoría de las rutas, se saturara. En consecuencia se hizo necesario limitar el número de usuarios de diseño, lo cual se puede apreciar mediante el factor de utilización, que resultó ser muy bajo.

- Una implicación inmediata de lo anterior, es que se tendría que elevar el costo del servicio, pues con la cantidad de usuarios que se atenderían no sería suficiente para cubrir las inversiones que implican el mejoramiento de la infraestructura, por ejemplo la adquisición de los servidores de vídeo. Para hacer más rentable el servicio de VoD se sugiere cambiar la topología de la red a una la topología que interconecte: 1) los nodos A, B, C y D en anillo. 2) los nodos E, F, G, H, I, J y K en anillo. y 3) los nodos D e I en anillo. De ésta manera se reduciría el número de enlaces favoreciendo así el incremento de la capacidad no sólo en el enlace obligatorio sino también en los otros enlaces.

- Lo anterior pone de manifiesto que la infraestructura actual de la TPBC es insuficiente para prestar un servicio de vídeo bajo demanda (VoD) rentable, con

lo que se refuta la hipótesis original de que los recursos disponibles serían adecuados.

- Los resultados encontrados sugieren que el retardo total (del orden de los microsegundos) esta muy por debajo de los retardos usuales encontrados en las redes típicas para VoD (del orden de los milisegundos). Esto implica que el número total de colas en la red esta muy pequeño, es decir la cantidad total de mensajes en la red es pequeña. Lo anterior es otra consecuencia natural de la subutilización de la red de transporte.

- Se hizo evidente a partir de la revisión de la teoría de la red de transporte que no sólo se puede evaluar la calidad de una señal de vídeo estimando los retardos de las celdas (mensajes) sino que también es necesario determinar el caudal de células perdidas. Para lograr este último propósito sería indispensable realizar pruebas de campo "*in situ*" y usar un software apropiado que permita registrar las variables antes mencionadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALCATEL. Technical Paper: "Video Over DSL Architecture". February 2001.
Ubicado en: <http://www.alcatel.com>

- [2] ATM Forum, Audiovisual Multimedia Services: Video on Demand Specifications
1.0. ATM Forum, January 1996.

- [3] CAMERANO FUENTES, Rafael. Módulo: Evaluación del desempeño de redes.
Ciclo III. Especialización en Telecomunicaciones. Universidad Industrial de
Santander. Marzo 2003.

- [4] CUENCA, Pedro. OLIVARES, Teresa. LOZANO, María. CAMINERO, Blanca.
Artículo: "Transmisión robusta de señales de vídeo sobre redes de banda
ancha". Departamento de Informática. Universidad de Castilla - La Mancha.
Albacete (España)

- [5] FIERRO, Patricia y SUÁREZ, Bibiana. Artículo: "Diseño de una red para la
prestación del servicio de video por demanda en una empresa de TPBC", 2002.

- [6] KO, Miranda. KOO, Irene. An Overview of Interactive Video On Demand System. University of British Columbia. December 1996. Ubicado en: <http://www.ece.ubc.ca/~irenek/techpaps/vod/vod.html>
- [7] LEON-GARCIA, Alberto. WIDJAJA, Indra. Redes de Comunicaciones. Conceptos Fundamentales y Arquitectura Básica. Mc Graw Hill. España 2002.
- [8] LITTLE, T. D. C. VENKATESH, D. Artículo: "Prospects for Interactive Video-on-Demand". Multimedia Communications Laboratory. Department of Electrical and Computer Engineering. Boston University, Boston, Massachusetts 02215, USA 1994.
- [9] Normas ISO de codificación de contenidos audiovisuales
- [10] RAJAPAKSHE, H. QUEK, D.P. Video on Demand. University of London. Junio 1995. Ubicado en: http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_95/journal/vol4/shr/report.html
- [11] STREAMBOX. "The Cache Server: Streambox solves the DSLAM bottleneck problem", December 2001. Ubicado en: <http://www.streambox.com/technology/Streambox%20Client%20White%20Paper.pdf>

[12] TANENBAUM, Andrew S. Redes de Computadores. Tercera Edición. Prentice Hall. México 1997.

[13] WANG, Steve Y. MEYER, Stephen E. LAI, Ming Yee. Artículo: "Quality of Service for Residential Broadband Video Service". Bell Communications Research, Inc. 1996.

ANEXOS

Anexo A: Acrónimos

AAL: ATM Adaptation Layer

ABR: Available Bit Rate

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

ATM: Asynchronous Transfer Mode

ATU-C: ADSL Transceiver Unit Central

ATU-R: ADSL Transceiver Unit Remote

CAP: Carrierless Amplitude-Phase Modulation

CATV: Cable Television

CBR: Constant Bit Rate

CDV: Cell Delay Variation

CER: Cell Error Ratio

CLR: Cell Loss Ratio

CMR: Cell Misinsertion Ratio

CPCS: Common Part Convergence Sublayer

CS: Convergence Sublayer

CTD: Cell Transfer Delay

DMT: Discrete Multi Tone

DSLAM: Digital Subscriber Line Access Multiplexer

FTTH: Fiber To The Home

FTTC: Fiber To The Curb

HDTV: High Definition Television

HFC: Hybrid Fiber Coax

MPEG: Motion Picture Expert Group

nrt-VBR: Non Real Time

N-VoD: Near Video On Demand

OC: Optical Carrier

PPV: Pay Per View

QoS: Quality of Service

Q-VoD: Quasi Video On Demand

RAID (Redundant Array of Inexpensive Disks

rt-VBR: Real Time Variable Bit Rate

SAR: Segmentation And Reassembly

SECBR: Severely Errored Cell Block Ratio

SSCS: Service Specific Part Convergence Sublayer

STB: Set Top Box

STT: Set Top Terminal

TPBC: Telefonía Pública Básica Conmutada

T-VoD: True Video On Demand

UBR: Unspecified Bit Rate

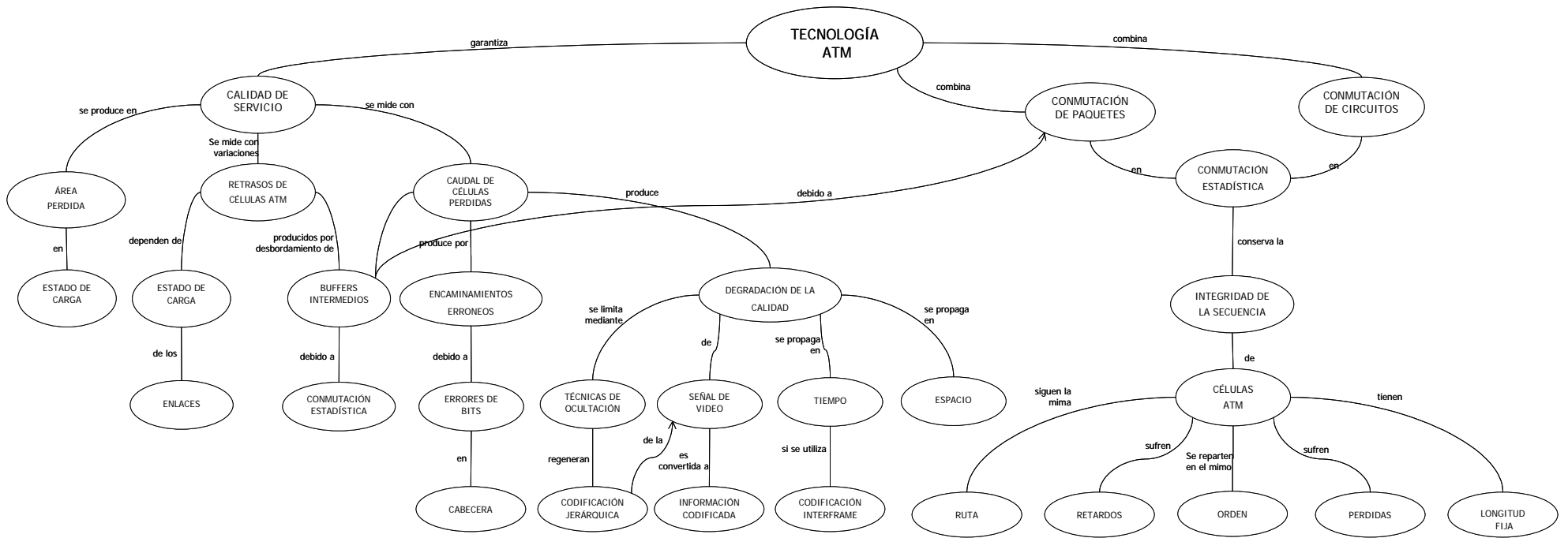
VIP: Video Information Provider

VoD: Video on Demand

Anexo B: Raíz cuadrada del matriz de tráfico del enlace

F\D	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	RAIZ(l_{ij})
A	0	0	510	73	0	0	0	0	0	0	0	583
B	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	68
C	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
D	542	514	0	0	0	0	0	0	573	0	0	1629
E	0	0	0	0	0	0	0	0	52	0	0	52
F	0	0	0	0	0	0	0	0	58	0	0	58
G	0	0	0	0	0	0	0	0	115	0	0	115
H	0	0	0	0	0	0	0	0	103	0	0	103
I	0	0	0	82	480	428	813	744	0	510	510	3567
J	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	68
K	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	68
RAIZ(l_{ij})	610	514	510	223	480	428	813	744	1037	510	510	6379

Anexo C : Artículo: "Transmisión robusta de señales de vídeo sobre redes de banda ancha"



Anexo D: Análisis de tráfico

