



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE CATALUNYA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Contribución a la Regulación del Tráfico en Redes ATM.
Aplicación al Tráfico de Vídeo.**

TESIS DOCTORAL

**Luis J. de la Cruz Llopis
Director: Dr. Jorge Mata Díaz**

1999

CAPÍTULO 5

ASIGNACIÓN DINÁMICA DE RECURSOS DE RED

Dentro de los factores que provocan la variabilidad del tráfico de vídeo se encuentran los producidos por el algoritmo de codificación y los producidos por la distinta complejidad de las secuencias a codificar. Con objeto de reducir el impacto de los primeros en la necesidad de recursos de red, en el capítulo anterior se ha propuesto un nuevo sistema para la conformación del tráfico de vídeo MPEG VBR previa a su transmisión, y se han analizado y obtenido mediante simulación las ventajas que supone. La mejora es mayor cuanto menos variable es la secuencia a codificar. Esto es debido a que la ganancia de suavizado se obtiene principalmente por la eliminación de los picos de tasa producidos durante los niveles más elevados de actividad de la secuencia completa. Son precisamente estos instantes de elevada actividad los que condicionarán los recursos necesarios para mantener la calidad de servicio predeterminada.

Debido por tanto a la variabilidad de las escenas a codificar, los recursos asignados a una conexión serán superiores a los necesitados durante los momentos de actividad media o baja. Así, con objeto de lograr una mayor eficiencia en la transmisión, se propone la asignación dinámica de recursos de red, dependiendo del nivel de actividad en que se encuentre la secuencia de vídeo. De esta forma, en los momentos de baja actividad será posible llevar a cabo una liberación de recursos que podrán ser empleados por otras conexiones. Por otro lado, cuando la actividad sea más alta, se solicitarán mayores recursos con objeto de mantener la calidad de servicio deseada.

1 Introducción

Las técnicas de suavizado propuestas en el capítulo anterior son útiles para extraer la variabilidad producida en el tráfico de vídeo por el algoritmo de codificación MPEG, quedando aún presente la producida por la distinta complejidad de los diferentes cuadros y escenas a codificar dentro de la secuencia completa. La principal consecuencia es que la ganancia obtenida de suavizado se debe sobre todo a la eliminación de los picos periódicos de tasa pertenecientes a los cuadros I durante los periodos de mayor actividad de la secuencia. Para mantener la calidad de servicio al nivel deseado, se deberá contratar con la red una conexión que permita una correcta transmisión durante estos periodos de elevada actividad. Como consecuencia, durante los periodos de menor actividad se mantendrán ocupados unos recursos de red que no serán necesarios. Conclusiones similares a las expuestas se presentan en [GroKes97] basadas en el trabajo previo realizado en [TseGal95].

En general, la variabilidad de la tasa generada por un codificador de vídeo debida a causas extrínsecas puede ser debida a múltiples factores. Entre ellos se pueden citar los siguientes [ReiRay96]:

- Complejidad variada de las escenas.
- Utilización por parte del usuario de prestaciones añadidas, como el avance rápido o la pausa en un servicio VoD.
- Necesidades instantáneas de mayor resolución, como en el caso de hacer mayor una ventana dentro de una aplicación deseando obtener la misma resolución.
- Acceso a bases de datos multimedia, en los cuales en ocasiones se solicitará transmisión de vídeo mientras que en otras no será necesario.

Así, el mecanismo de transmisión de servicios que incorporen tráfico de vídeo deberá ser lo más flexible posible, adaptándose a los requisitos variables que van a presentar, tanto usuarios, como servicios y operadores de red. Con objeto de conseguir la citada flexibilidad, en este capítulo se propone una técnica de asignación dinámica de ancho de banda a las conexiones de vídeo. De este modo, en los instantes de actividad media o baja, se podrán ceder recursos a la red que serán utilizados por otras conexiones. Por otro lado, en los instantes de actividad elevada, se solicitará una cantidad mayor de recursos con objeto de mantener la calidad de servicio requerida [ReiRam95][ReiRay96][Ada96]. Como se verá, el tiempo de permanencia en estos instantes de actividad está dentro del nivel temporal de llamada. A este nivel, la ganancia de multiplexación estadística no es apreciable a no ser que el número de fuentes multiplexadas sea elevado, haciendo aún más interesante el sistema de asignación dinámica de recursos.

La técnica presentada en este trabajo está especialmente diseñada para tratar con la variabilidad producida principalmente por la diferente complejidad de los cuadros y secuencias a transmitir. Este factor será sin duda el más importante en servicios como el VoD. Para ello, se añadirá al conformador presentado en el capítulo anterior un nuevo elemento supervisor y controlador. La implementación de este elemento se ha basado en un modelo previamente desarrollado para el tráfico de vídeo MPEG VBR a nivel de GoP. Este modelo será presentado en el siguiente apartado de este capítulo. La propia estructura bidimensional del modelo presentado llevará a la identificación de tres niveles de actividad en las secuencias de vídeo, que serán los utilizados para la solicitud y liberación de recursos de red.

El resto de este capítulo está estructurado como sigue. En primer lugar, se realiza un repaso de las recientes propuestas existentes para los sistemas con asignación dinámica de recursos, en los cuales es el emisor quien está solicitando las variaciones de ancho de banda. Se abordarán mecanismos que proponen tanto la renegociación de servicios a tasa constante como a tasa variable. Además, se detallarán algunas de las posibilidades para la implementación de los mecanismos de renegociación. Finalmente, se presentará un nuevo mecanismo, desarrollado en este trabajo, basado, como se ha comentado en el párrafo anterior, en la identificación de niveles de actividad en las fuentes de vídeo MPEG VBR. Esta identificación es posible gracias al modelado previo del tráfico a nivel de GoP. Este modelo es introducido en el siguiente apartado.

A continuación, se propone el elemento supervisor y controlador, que será el encargado de llevar a cabo las renegociaciones de ancho de banda con la red y el control de tasa necesario sobre la fuente cuando dichas renegociaciones sean bloqueadas. Este control de tasa se realizará de forma incremental. El correcto funcionamiento del sistema propuesto se comprueba mediante el análisis de la respuesta a una secuencia de pruebas. Dicha secuencia contiene varios escalones que simulan cambios bruscos de actividad de la fuente de vídeo.

Como último paso en la construcción del interfaz buscado para las fuentes de vídeo MPEG VBR sobre redes ATM, se combinará el elemento supervisor controlador con el conformador de tasa presentado en el capítulo anterior. De esta forma se llega a la propuesta final de un elemento capaz de conseguir una gran eficiencia en la utilización de los recursos asignados a cada conexión. Se pondrá de manifiesto como el sistema funciona correctamente cuando el conformador utilizado es el conformador predictivo propuesto en este trabajo. Los conformadores clásicos darán lugar a oscilaciones que serían solventables aplicando técnicas de control. Con todo, estos conformadores introducirían retardos que los hacen inapropiados para su utilización en el sistema con renegociaciones. Además, se analizarán las posibilidades de utilización del sistema

renegociando servicios a tasa constante y a tasa variable, mostrándose las ventajas de la utilización de la asignación dinámica de recursos en ambos casos.

Finalmente, se procederá a la comprobación de los resultados obtenidos mediante simulación sobre trazas de tráfico real. Se ensaya sobre diferentes posibilidades en función de que la red acepte o no las solicitudes de variación de ancho de banda. Además, se cuantifica la ganancia obtenida respecto a los sistemas clásicos sin renegociación.

2. Servicios con asignación dinámica de recursos

Como se ha comentado, el objetivo principal de este capítulo es la renegociación dinámica de los recursos de red asignados a las conexiones para la transmisión de servicios de vídeo MPEG VBR. En este apartado se analizan propuestas de servicios con asignación dinámica, en los cuales es el usuario el que decide llevar a cabo la renegociación de los parámetros descriptores de su conexión. Del mismo modo que para servicios con asignación estática de recursos existe la posibilidad entre solicitar conexiones a tasa constante o variable (CBR o VBR), se puede llevar a cabo una distinción entre los servicios con asignación dinámica. Así, la renegociación podría implementarse sobre conexiones a tasa constante o a tasa variable, dando lugar a los siguientes servicios:

- Renegociación de tasa binaria constante (*Renegotiated CBR*, RCBR).
- Renegociación de tasa binaria variable (*Renegotiated VBR*, RVBR).

2.1 RENEGOCIACIÓN DE TASA BINARIA CONSTANTE

De entre todos los mecanismos de asignación dinámica de recursos, el RCBR [GroKes97][SalZha98], es el más sencillo que puede implementarse. Mediante RCBR, una fuente puede renegociar su tasa de servicio mediante el envío de un mensaje de señalización en el que se solicita el incremento o el decremento de la tasa actual.

Si la renegociación es admitida por la red, la fuente puede enviar datos a una nueva tasa constante, manteniendo los pequeños buffers característicos de este servicio. En caso contrario, la fuente deberá adaptarse a la tasa que tenía disponible antes de la solicitud. Este hecho implicaría el crecimiento de unidades en el buffer y la posible pérdida de celdas. Dependiendo del servicio, esta degradación en las prestaciones ofrecidas podría no ser admisible. Posibles soluciones son las que se detallan a continuación:

- Una solución preventiva consistiría en ir manteniendo una tasa de servicio por parte de la red cercana a la tasa de pico de la fuente, con lo que las necesidades de renegociación serían menores y disminuiría la probabilidad de rechazo.

Evidentemente, la eficiencia en la utilización de los canales de transmisión sería menor.

- Por otra parte, se pueden instalar mecanismos de admisión de llamadas que tengan en cuenta la posibilidad de estos rechazos de renegociación. Así, ante la posibilidad de que las renegociaciones vayan a ser rechazadas en un gran número de ocasiones, simplemente se bloquearía la llamada. De esta forma se podría garantizar además la calidad de servicio a las conexiones ya establecidas, a costa de un aumento en la probabilidad de bloqueo.
- Finalmente, existe la posibilidad de solicitar a la fuente la disminución de la tasa de transmisión.

Las dos últimas opciones serán las tenidas en cuenta principalmente más adelante al tratar la transmisión de servicios de vídeo, tanto en el caso de que las imágenes se estén codificando en tiempo real como en el caso de que hayan sido almacenadas previamente para su posterior retransmisión.

La señalización necesaria durante la renegociación de un servicio RCBR es extremadamente simple. Los conmutadores no necesitan buscar nuevas rutas ni asignar nuevos circuitos virtuales. En RCBR, tan sólo es necesaria la asignación de mayor o menor capacidad de canal. En particular, en las redes ATM se pueden utilizar las celdas destinadas a la gestión de recursos (*Resource Management*, RM), propuestas originalmente para el servicio ABR. Así, una fuente RCBR puede indicar de forma explícita la diferencia entre su antigua y nueva tasa en el campo especialmente dedicado a ello en la celda RM (*Explicit Rate*, ER). Utilizando esta diferencia se simplificaría el procesado en el controlador del conmutador, que no necesitaría ir guardando la tasa actual de la fuente. Dicho controlador tendría solamente que comprobar la posibilidad de asignar la tasa solicitada por el puerto de salida que esté utilizando la conexión. Como resultado podría aceptarla o negarla mediante la modificación del campo ER.

El mecanismo de implementación expuesto en el párrafo anterior es más simple que el requerido para un servicio ABR, lo cual prueba la posibilidad de que los conmutadores ATM soporten el servicio RCBR.

2.2 RENEGOCIACIÓN DE TASA BINARIA VARIABLE

La segunda solución para servicios con asignación dinámica de recursos solicitada por el usuario consiste en la renegociación de conexiones a tasa variable. Esta modalidad ha sido utilizada en trabajos como [ReiRay96][ZhaKni97].

El primero de ellos se basa en la renegociación de los parámetros descriptores de tráfico para una conexión clásica VBR, es decir, tasa de pico (λ_p), tolerancia de ráfaga (*Burst Tolerance*, BT) y tasa sostenida (λ_s). La aplicación es para un sistema MPEG VBR, calculando los parámetros necesarios cuadro a cuadro (tomando como base el

GoP) y solicitando la renegociación en función de la información almacenada en el buffer local.

Por otra parte, en [ZhaKni97] se propone un servicio de tasa variable determinístico renegociado (*Renegotiated Deterministic VBR*, RED-VBR), en el cual la fuente especifica su tráfico basándose en un modelo de tráfico que lo acota determinísticamente por intervalos (*Deterministic Bounding INterval Dependent*, D-BIND). Básicamente, estos modelos describen el tráfico a través de una serie de pares (longitud de intervalo, tasa durante el intervalo).

2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO DE RENEGOCIACIÓN

Uno de los problemas más importantes a solucionar si se trata de dar un servicio con renegociación de ancho de banda es cuándo se deben solicitar dichas renegociaciones, y cuánto ancho de banda se debe solicitar. Las soluciones a estos aspectos serán diferentes en función del tipo de servicio que se esté renegociando y del tipo de fuente de tráfico que se esté tratando. Por ejemplo, si se trata de una secuencia de vídeo previamente almacenada, se podría calcular un programa de renegociaciones óptimo a priori para toda la secuencia. Además, al conocer dicho programa, las solicitudes de renegociación se podrían hacer con suficiente tiempo de antelación de forma que disminuyese la probabilidad de que la red bloquease estas solicitudes. Incluso se podrían arbitrar mecanismos de admisión de llamadas en función del programa de renegociaciones que llevasen asociado, evidentemente añadiendo complejidad a las funciones a desarrollar por los conmutadores.

En [GroKes97] se presenta un sistema para el cálculo del programa óptimo de renegociaciones para este tipo de fuentes y con renegociación CBR. Está basado en un algoritmo similar al de Viterbi, minimizando una función de coste que pondera la tasa de servicio que se necesita en cada tramo y el número de renegociaciones que se van realizando. Además, se tienen en cuenta requisitos en cuanto a tamaño de buffer o en cuanto a retardo máximo permitido.

Por otra parte, el mecanismo propuesto para este mismo tipo de secuencias en [ZhaKni97] está, como se ha comentado, basado en los modelos D-BIND. Se propone buscar una segmentación adecuada y proporcionar los pares (intervalo, tasa) para dicha segmentación. Evidentemente, cuanto más alta sea la segmentación mayor será la eficiencia de utilización de recursos que se podrá alcanzar, a costa de un aumento en el número de renegociaciones, y en la complejidad de las operaciones necesarias para el control de admisión de nuevas conexiones. La optimización de este algoritmo ha sido pospuesta por los propios autores para trabajos futuros.

Cuando se trata de trabajar sobre fuentes de vídeo con codificación en tiempo real, es decir, sin la posibilidad de trabajar sobre una información almacenada de antemano,

el problema es distinto. Las distintas soluciones propuestas son en gran medida heurísticas, y basadas en la cantidad de información en un buffer local, como es el caso de [ReiRay96].

El mecanismo presentado en este trabajo para la solicitud de renegociaciones se diferencia de los comentados previamente en varios aspectos. En primer lugar, se basa en el modelado del tráfico a transmitir mediante un modelo de fluidos binomial bidimensional que se presenta en la siguiente sección de este capítulo. Así, se hace necesario un conocimiento previo del tráfico, que no supondrá ningún problema adicional, salvo la necesidad de ajuste de un factor en función de la calidad con que se esté codificando la secuencia de vídeo a transmitir. En segundo lugar, el método podrá ser utilizado tanto para secuencias almacenadas de vídeo como para secuencias codificadas en tiempo real. Por otra parte, trabajará sobre tráfico conformado mediante alguno de los métodos propuestos en el capítulo anterior, con lo cual las variaciones de tasa a corto plazo son previamente extraídas, y el sistema sólo necesita preocuparse de la renegociación para las variaciones a largo plazo.

3. Modelado del tráfico MPEG VBR a nivel de GoP

3.1 MODELO DE FLUIDOS BIDIMENSIONAL

En el capítulo anterior se ha comprobado que la forma óptima de entregar el tráfico de vídeo MPEG a la red es mediante una conformación previa. Además, se han corroborado hipótesis anteriores, que apuntaban hacia la unidad estructural de GoP como la más adecuada para tomar como base en la conformación. A partir de este momento, para continuar trabajando sobre la transmisión de este tipo de tráfico sobre redes ATM, se hará por tanto necesaria la utilización de un modelo a nivel de GoP.

El modelo que se utilizará en este capítulo es un modelo de fluidos modulado por Markov (*Markov Modulated Fluid Process*, MMFP), presentado y validado previamente en [Mat96][CruFer98]. Se partirá de un MMFP clásico con probabilidades de alcanzar los estados distribuidas de forma binomial. La función de autocorrelación de estos procesos es exponencial [MagAna88]. La cadena de Markov es una cadena de nacimiento y muerte que puede describir un sistema con un número infinito de servidores, con distribución de tiempo exponencial de parámetro β , y donde las llegadas se producen desde una población finita de S elementos con tasa individual de generación poissoniana α . Este sistema, según la notación de Kendall, sería un $M/M/\infty/S$. Según el estado de la cadena de Markov se genera a una tasa constante. Se puede considerar un valor mínimo de generación en el estado 0 de valor A_1 . Las tasas de generación entre estados consecutivos se suelen fijar de forma que difieran en un valor constante A .

Los procesos MMFP binomiales tienen la propiedad fundamental de poderse descomponer en la agregación de procesos elementales ON/OFF. Así, un proceso genérico se puede descomponer en S procesos simples. La estructura genérica de este tipo de modelos y la descomposición en fuentes simples se presenta en la figura 5.1.

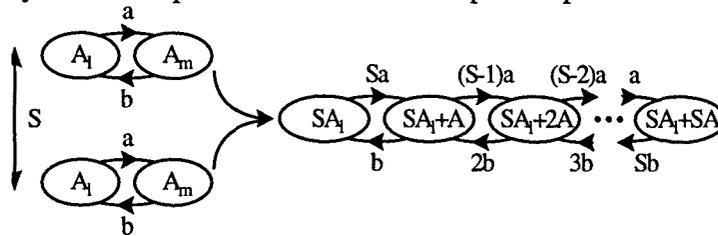


Figura 5.1. Proceso MMFP binomial y descomposición en fuentes simples ON/OFF

Con objeto de capturar tanto las dependencias a largo plazo presentadas por el tráfico de vídeo, como la posibilidad de generación de tasas con función de densidad de probabilidad ajustada al tráfico real, se hace necesario el desarrollo de un modelo bidimensional. De esta forma, una de las dimensiones se encarga de modelar las dependencias a corto plazo, mientras que la otra lo hace con las dependencias a largo plazo. La descomposición de este modelo es posible mediante dos tipos de fuentes simples, una para cada dimensión, variando tanto las tasas de nacimiento y muerte como el salto en el nivel de generación entre estados, como se observa en la figura 5.2.

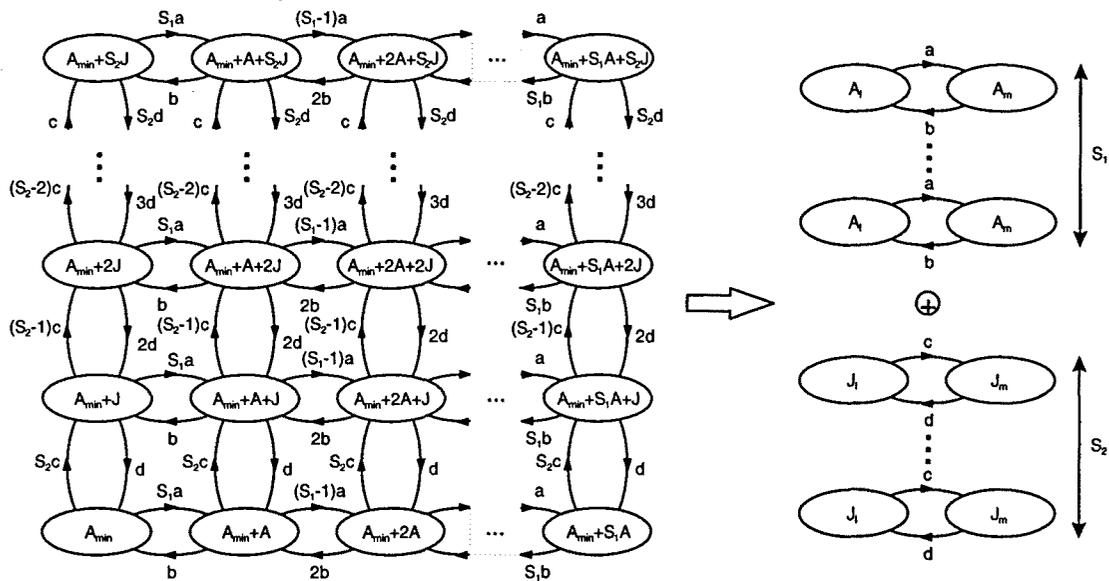


Figura 5.2. Modelo de fluidos bidimensional y descomposición en fuentes simples

Tras llevar a cabo el ajuste del modelo al tráfico real de vídeo, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.1. Para ello se utilizó una secuencia suficientemente larga, con objeto de incluir todas las posibilidades de actividad que puedan aparecer en una transmisión clásica. La secuencia elegida para este estudio fue "Jurassic Park", con un parámetro de cuantificación $Q=6$, lo cual nos da una suficiente variabilidad de escenas y una buena calidad de codificación. Calidades mucho más bajas

no serían, en general, admitidas por usuarios finales en servicios como el VoD. El modelo finalmente obtenido para el tráfico MPEG VBR a nivel de GoP se muestra en la figura 5.3.

S1	S2	A _{min}	A	a (s ⁻¹)	b (s ⁻¹)	J	c (s ⁻¹)	d (s ⁻¹)
5 fuentes	2 fuentes	93330 bits/GoP	130809 bits/GoP	0.01056	0.03244	375406 bits/GoP	0.000028	0.001786

Tabla 5.1. Parámetros del modelo MMFP bidimensional

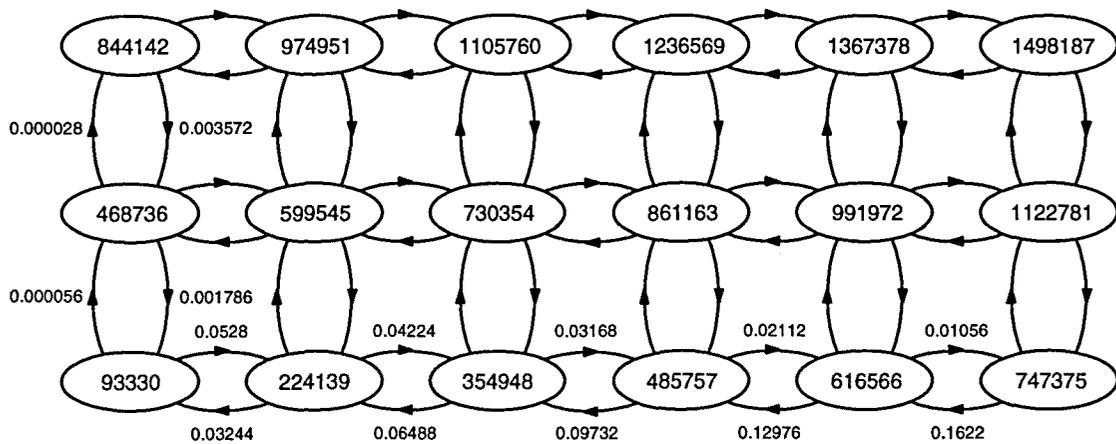


Figura 5.3. Modelo de fluidos bidimensional ajustado con la serie "Jurassic Park"

3.2 NIVELES DE ACTIVIDAD DE UNA FUENTE DE VÍDEO

Obsérvese que, por la propia estructura del modelo bidimensional sintetizado, los estados de generación del conjunto de fuentes simples de tipo 1 para un mismo nivel de actividad de las fuentes de tipo 2, definen, de forma natural, tres niveles de actividad de la fuente de vídeo. Este hecho queda ilustrado en la figura 5.xx. El tiempo de permanencia en estos niveles captura la relación temporal a largo término de la generación y viene condicionado por las tasas de transición de las fuentes simples de tipo 2. A su vez, la transición entre niveles de actividad simula los posibles cambios significativos de actividad que se producen en una secuencia de vídeo de este tipo, dando lugar a los tres niveles siguientes:

- Nivel 0 o nivel de actividad regular.
- Nivel 1 o nivel de actividad elevada.
- Nivel 2 o nivel de gran actividad.

La identificación de estos tres niveles, que queda esquematizada en la figura 5.4, será fundamental en el funcionamiento del elemento supervisor y controlador de tasa que será presentado posteriormente dentro de este mismo capítulo.

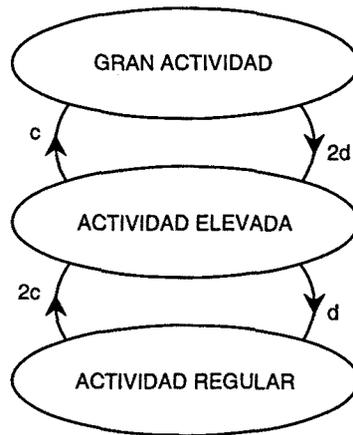


Figura 5.4. Niveles de actividad definidos por el modelo MMFP bidimensional

De la figura 5.3 se extraen los valores a los cuales la fuente cambia de nivel de actividad. Estos valores, y los ciclos de histéresis que definen, se muestran en la figura 5.5 y en la tabla 5.2.

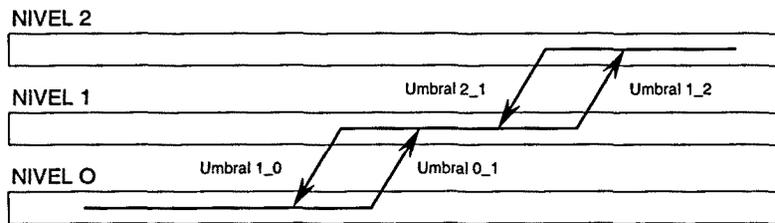


Figura 5.5 Tasas de transición entre niveles de actividad y ciclos de histéresis

Umbral 0_1	Umbral 1_2	Umbral 2_1	Umbral 1_0
124562 bits/cuadro	187130 bits/cuadro	140690 bits/cuadro	78122 bits/cuadro

Tabla 5.2. Umbrales de transición entre niveles para el modelo MMFP bidimensional

4. Supervisión y control de fuente de vídeo MPEG VBR

En este apartado se introduce el nuevo elemento supervisor y controlador (SC) propuesto en este trabajo. Dicho elemento basará sus operaciones en el conocimiento del tráfico sobre el que actuará mediante el modelo bidimensional de fluidos ajustado previamente. Su funcionamiento básico consistirá en la comparación de un valor de tasa de entrada con los umbrales de transición calculados anteriormente. De esta forma, el supervisor controlador tendrá información sobre el estado de actividad en que se encuentra la fuente en cada momento. En función de dicho estado, se renegociará la cantidad de recursos asignados a la conexión. Así, las funciones de este nuevo elemento, que aparece en la figura 5.6, serán:

- Solicitud y liberación de recursos de red en función del nivel de actividad de la fuente de vídeo.
- Control de parámetros de usuario con objeto de evitar que se sobrepase el contrato establecido con la red.

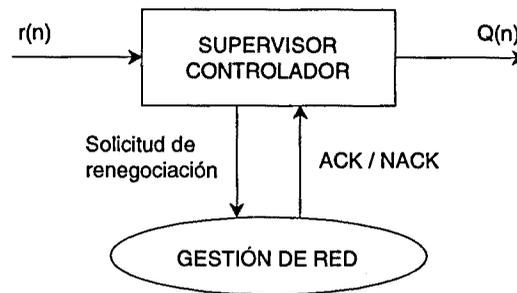


Figura 5.6. Supervisor controlador para codificador en tiempo real

Para su funcionamiento, la información de entrada al SC será el tamaño del cuadro que se está enviando a la red en cada ranura temporal. Para nuestro estudio, esta ranura será igual al tiempo de transmisión de un cuadro, que es de 40 ms para un sistema clásico europeo (PAL) funcionando a 25 cuadros por segundo. Por otro lado, el SC intercambiará mensajes de señalización con la red, para la solicitud de renegociaciones y recepción de las respuestas. En función del resultado de estas renegociaciones, se deberá regular la tasa proveniente del codificador, indicándole el valor del paso de cuantificación que debe utilizar para la codificación del siguiente cuadro. Es decir, para un codificador MPEG en tiempo real, se utilizará el método de solicitud de disminución de tasa mientras la renegociación no sea admitida.

Normalmente, el codificador funcionará empleando un parámetro Q de valor nominal, dependiendo de la calidad que se desee en cada servicio. En los momentos en que la tasa de entrega a la red supere la capacidad asignada de canal, y la renegociación sea rechazada, se aumentará su valor para disminuir la tasa de generación. Sin embargo, no es adecuado disminuir el valor de Q cuando se disponga de más capacidad de la que se está utilizando, debido a que esa capacidad excedente puede ser ocupada por otros servicios ABR o VBR.

La regulación del factor Q llevada a cabo en este trabajo se basa en una ley empírica, obtenida y presentada en [Mat96], que relaciona el factor en que se ve aumentada o reducida la tasa de salida del codificador con el parámetro Q utilizado. El ajuste de esta relación, normalizado para $Q=9$, se muestra en la figura 5.7.

La regulación del factor Q se llevará a cabo de forma incremental en función de la diferencia de tasa resultante entre la tasa actual de salida del codificador y el nivel máximo permitido en cada momento. Este nivel máximo dependerá del nivel de actividad que se tenga contratado con la red. Operando de forma clásica con la expresión de la figura 5.xx, se obtiene la relación de incrementos utilizada:

$$\Delta Q = 1.292 \frac{\Delta r}{r} Q \quad (5.1)$$

donde Q y r representan los valores actuales del parámetro Q y de la tasa saliente del codificador. Además, el valor resultante de Q estará limitado, tanto inferior como superiormente. La cota inferior será el valor nominal empleado por el codificador, pues

como se ha comentado no será aconsejable aumentar la calidad de la transmisión por encima de la contratada. Por otro lado, superiormente el valor de Q estará acotado por la propia funcionalidad del codificador MPEG, que no permite que este valor sea superior a 32. El valor final utilizado para el incremento será el resultante de tomar el entero inmediatamente superior para cada caso, dando lugar a la función escalonada que se muestra en la figura 5.8.

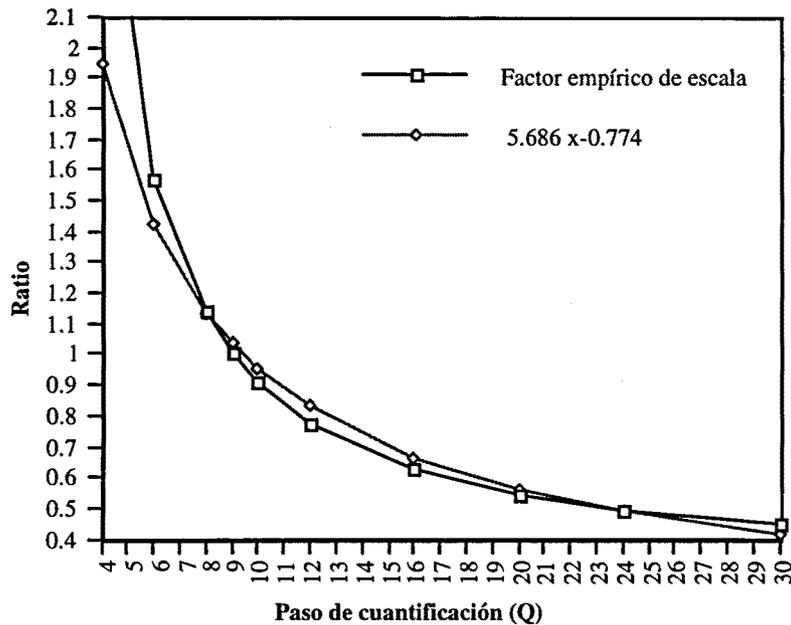


Figura 5.7. Factor de escala empírico para $Q=9$

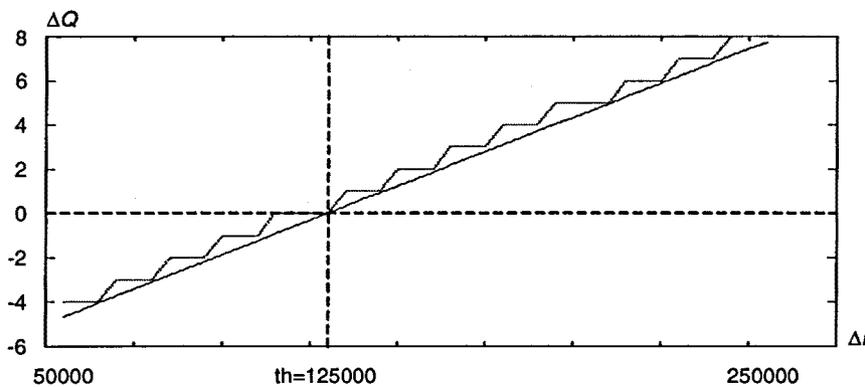


Figura 5.8. Relación entre ΔQ y Δr para $Q=6$ con tasa máxima permitida de 125000 bits por slot

El ajuste incremental presentado se evaluó en primer lugar sobre una secuencia de pruebas, simulando la tasa de salida de un codificador MPEG. Esta secuencia presentaba dos escalones, de forma que eran superados los dos umbrales de transición entre niveles. Posteriormente, se traspasaban de nuevo los umbrales en sentido descendente. La primera prueba realizada se llevó a cabo sin permitir la renegociación de tasa, con lo cual la tasa de salida se debía mantener siempre por debajo del primero de los umbrales. El resultado se muestra en la figura 5.9, en la cual se observa como, tras la detección del

paso por los umbrales, el sistema adapta rápidamente la tasa por debajo del umbral deseado. La evolución del factor Q durante esta prueba se presenta igualmente en la figura 5.10.

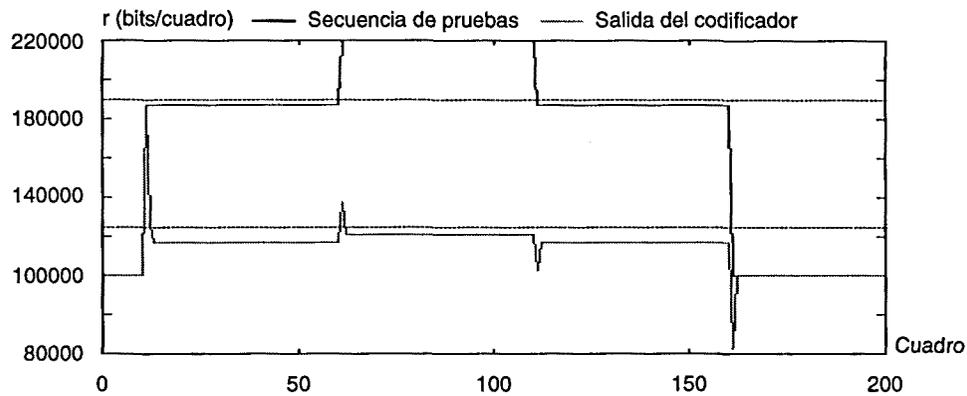


Figura 5.9. Regulación de la secuencia de pruebas

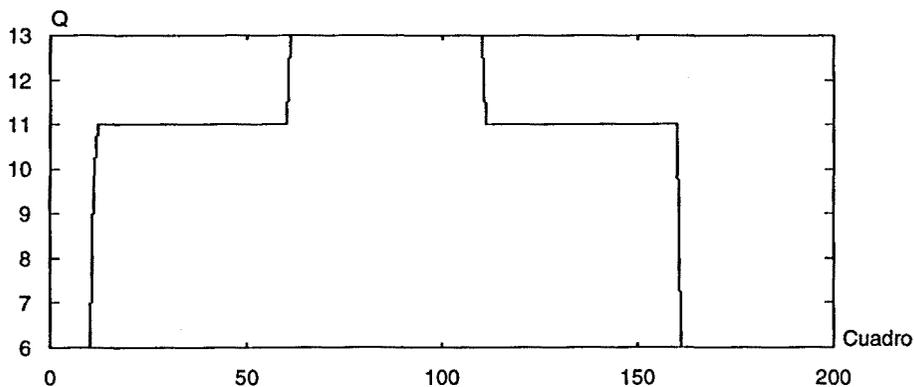


Figura 5.10. Evolución del factor Q para la secuencia de pruebas

Como siguiente paso, se llevó a cabo una simulación en la cual la renegociación de tasa era admitida, pero con una demora de diez tiempos de cuadro. Es decir, el controlador debía regular la tasa de salida durante diez cuadros, hasta que los nuevos recursos eran suministrados por la red. A partir de este momento, debía permitir que la secuencia de salida del codificador coincidiese con la de la secuencia de pruebas. Por otro lado, las transiciones de bajada se consideraron admitidas desde el momento de la solicitud. El buen funcionamiento obtenido se muestra en la figura 5.11, mientras que la evolución de Q se puede observar en la figura 5.12.

Para los casos en que se desee transmitir información de vídeo previamente almacenada en soporte digital, la regulación de tasa del codificador no se puede hacer mediante la variación del parámetro Q , ya que la codificación ha sido llevada a cabo de forma previa al almacenamiento. En estas situaciones, se puede recurrir a algunas de las técnicas de escalado:

- Escalado de resolución frecuencial: Descarte selectivo de coeficientes DCT, por ejemplo los de frecuencias más altas.

- Escalado de resolución temporal: Descarte selectivo de cuadros. Por ejemplo, un esquema básico podría descartar cuadros B, y tal vez P. Este método puede tener implicaciones serias en la calidad final del servicio, por lo que debe ser utilizado solamente si los bloqueos en la renegociación son muy poco frecuentes.
- Escalado de SNR: Implementable, por ejemplo, escogiendo entre el flujo básico y el flujo de mejora proporcionado por un codificador MPEG-2.

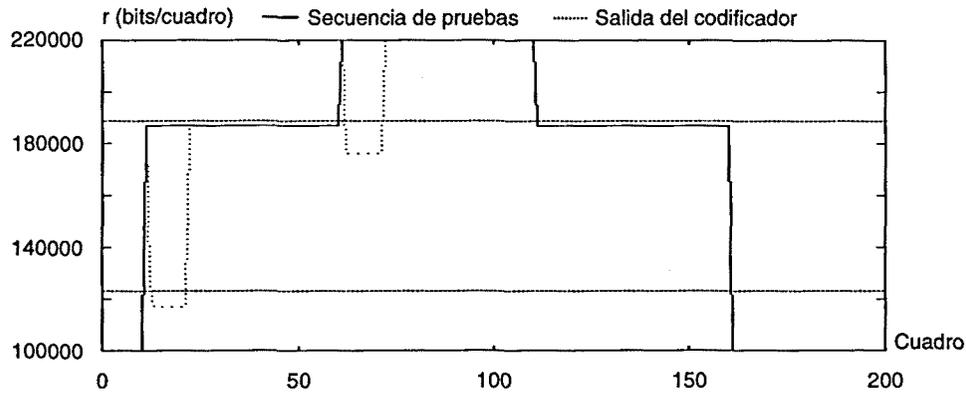


Figura 5.11. Regulación de la secuencia de pruebas con admisión y retardo de renegociación de 10 cuadros

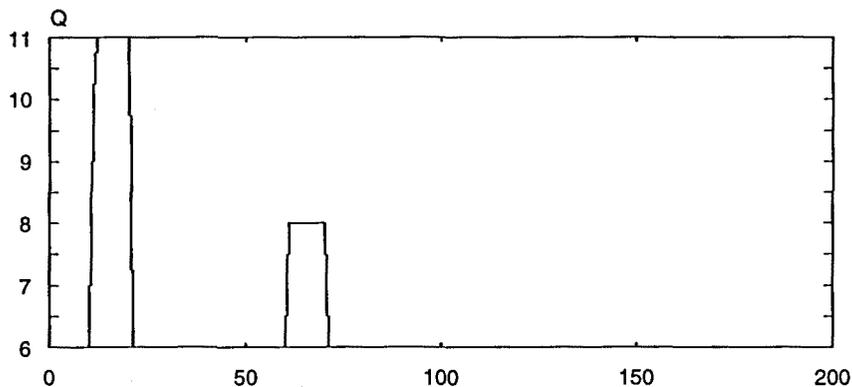


Figura 5.12. Evolución del factor Q con admisión y retardo de renegociación de 10 cuadros

5. Interfaz para fuente de vídeo VBR sobre red ATM

En este apartado se combinará la utilización del conformador de vídeo presentado en el capítulo anterior, con el supervisor controlador desarrollado en este capítulo. De esta forma, se obtiene un interfaz completo para la transmisión de vídeo comprimido de tasa variable sobre redes ATM. La figura 5.13 presenta un esquema de este dispositivo.

Como se ha venido comentando, la principal dificultad para tratar eficientemente el tráfico de vídeo es su naturaleza a ráfagas en distintas escalas de tiempo. El elemento finalmente propuesto en este trabajo permite resolver este problema de una forma eficiente, tanto en calidad de servicio como en aprovechamiento de recursos asignados. Por una parte, el comportamiento a ráfagas dentro de un GoP originado por el esquema

de codificación, es extraído por el conformador. Por otro lado, los cambios de actividad que podemos interpretar como pertenecientes al nivel de llamada, producidos por la entrada en altos niveles de actividad de la fuente, son tratados mediante la renegociación de recursos con la red.

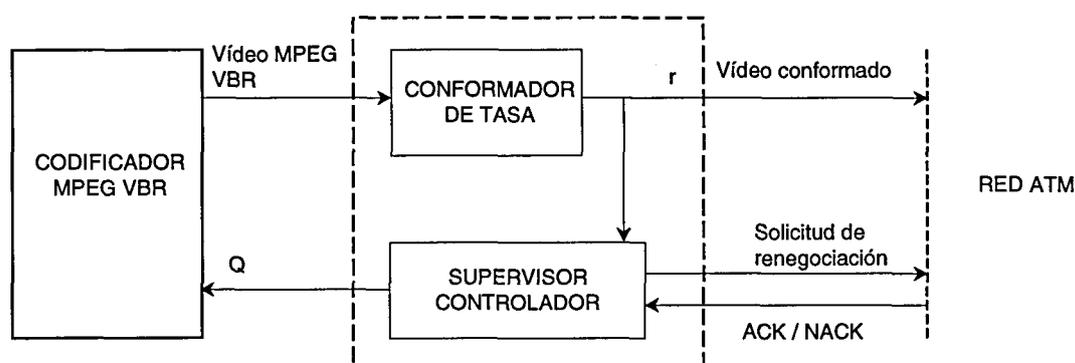


Figura 5.13. Interfaz para fuente de vídeo VBR sobre red ATM

En este momento es importante observar que, dentro de la planta a controlar propuesta en el apartado anterior, se ha introducido un nuevo elemento. Dicho elemento, el conformador de tasa, provocará un retardo entre la acción del controlador y la respuesta deseada. En otras palabras, la introducción de un suavizador, provocará que la respuesta al control se vea retardada desde el momento en que se aplica. De esta forma, se corre el riesgo de provocar oscilaciones en la tasa a la salida del interfaz y en el control realizado por el SC. Con objeto de asegurar el buen funcionamiento del sistema, se trabajó sobre la misma secuencia de prueba del apartado anterior. Además, se utilizaron tres de los conformadores presentados en el capítulo 4, particularmente los conformadores ideal, deslizante y predictivo. Para analizar la posible aparición del problema comentado, se trabajó sobre la peor situación posible, es decir, aquella en la cual no se permiten las renegociaciones de tasa. Las respuestas obtenidas con cada uno de los conformadores se presentan en las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 respectivamente. Como puede observarse, tanto el conformador ideal como el deslizante provocan oscilaciones desfasadas en la tasa de salida del codificador y en la tasa de salida del interfaz. Para evitar estas oscilaciones debería añadirse algún tipo de control. Sin embargo, aún así no serían adecuados para su utilización en el sistema con renegociaciones. Esto es debido a que nunca podrán evitar el retardo en la bajada de tasa, con lo que las pérdidas en los instantes iniciales de bloqueo serían elevadas. Sin embargo, el conformador predictivo, dada su rápida adaptación a los cambios bruscos de escena simulados, amortigua rápidamente las oscilaciones y alcanza un régimen estable de funcionamiento, con un controlador muy simple.

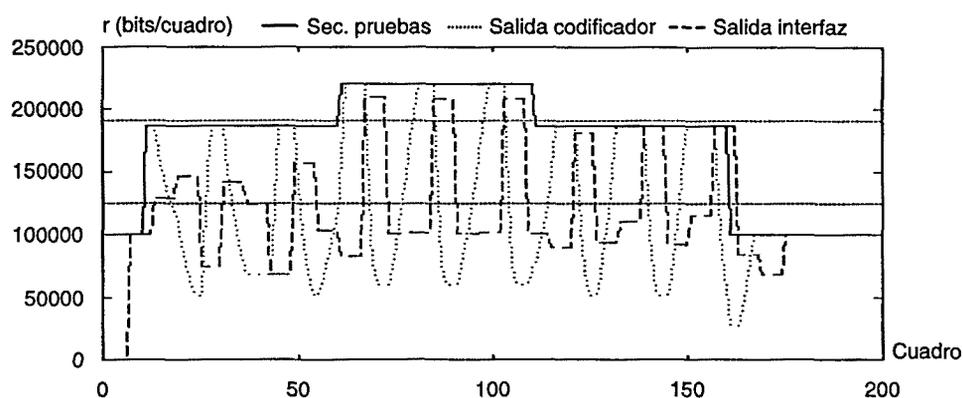


Figura 5.14. Respuesta del interfaz con conformación ideal

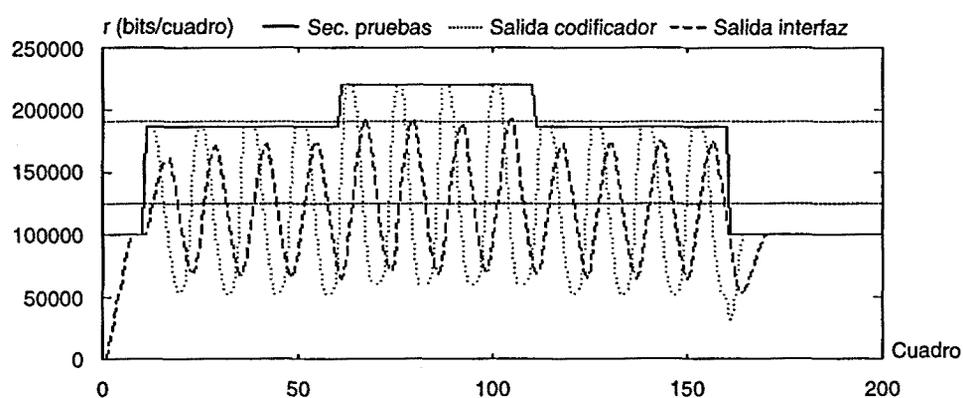


Figura 5.15. Respuesta del interfaz con conformación deslizante

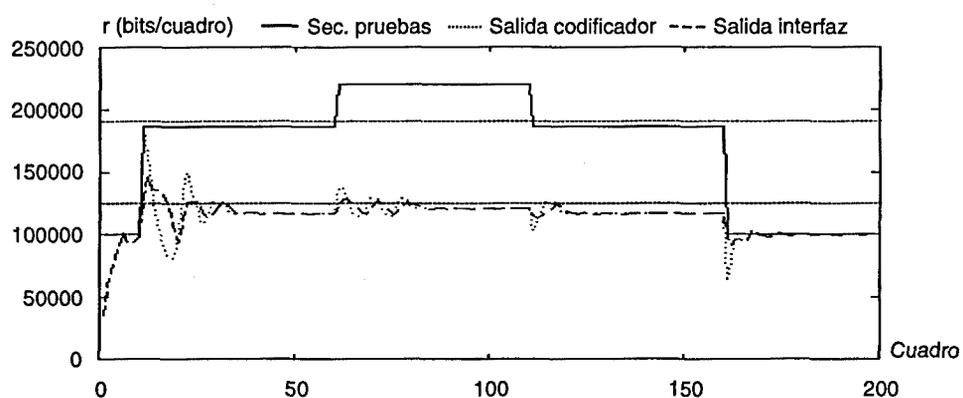


Figura 5.16. Respuesta del interfaz con conformación predictiva

Como última prueba previa al estudio de las prestaciones del interfaz con tráfico real, se hace necesario observar su comportamiento en los casos más usuales para los que está previsto, es decir, cuando las renegociaciones de tasa con la red van a ser admitidas tras un intervalo de demora. Como caso de prueba, se tomó la situación en la cual los nuevos recursos son proporcionados por la red tres tiempos de cuadro después de ser solicitados. Es decir, se simuló un retardo de negociación de 120 ms. La adaptación del sistema a esta nueva circunstancia se presenta en la figura 5.17, observándose como el interfaz se adapta correctamente a los cambios de subida y de bajada. En este momento se utiliza ya solamente el conformador predictivo, configurado

para un retardo máximo de tres tiempos de cuadro. Es de notar que este será el retardo total introducido por el sistema de suavizado y control de tasa previo a la entrega del tráfico de vídeo a la red. Como comprobación final, se añade en la figura 5.18 la variación del parámetro de cuantificación durante la transmisión en este último caso.

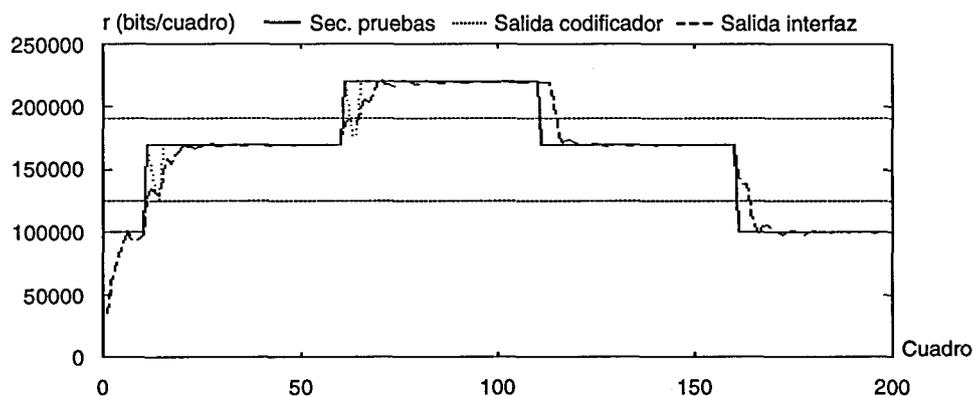


Figura 5.17. Respuesta del interfaz con conformación predictiva y renegociación permitida

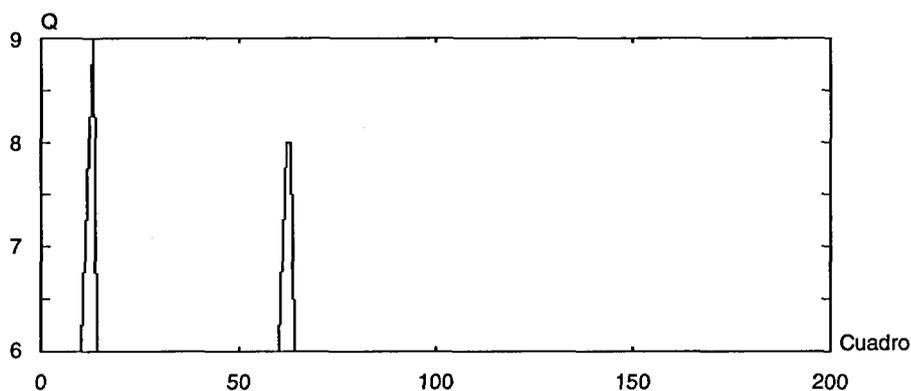


Figura 5.18. Evolución de Q con conformación predictiva y renegociación permitida

5.1 ASIGNACIÓN DINÁMICA DE RECURSOS A TASA CONSTANTE

Una vez adoptado e implementado el mecanismo a seguir para la regulación del tráfico y la solicitud o liberación de nuevos recursos de red, se debe escoger entre las posibilidades disponibles para la contratación de recursos durante el tiempo de permanencia en cada uno de los niveles de actividad. De entre estas posibilidades, la más sencilla consistirá en la contratación de servicios CBR dentro de cada uno de los niveles. Así, se estaría utilizando un servicio RCBR con tres posibles niveles de contratación de recursos (3-CBR).

Con objeto de mantener una calidad de servicio elevada, como la necesitada durante una transmisión de información multimedia, los recursos asignados para cada uno de los niveles deberán ser los necesarios durante los instantes de mayor tasa de transmisión dentro de cada nivel. En otras palabras, la capacidad de canal asignada a cada nivel deberá prácticamente igualar a la tasa de transmisión de pico dentro de cada uno de

ellos. De este modo, según el modelo presentado en el apartado 3, se necesitarían las capacidades que se detallan en la tabla 5.3.

Estado	C (bits/slot)	C (Mbps)
Actividad regular	124562	3.11
Actividad elevada	187130	4.68
Gran actividad	249698	6.24

Tabla 5.3. Capacidades de canal necesarias en servicio 3-CBR

Del estudio realizado se puede extraer también una capacidad media necesitada por una fuente de vídeo. Para ello, se hace necesario encontrar las probabilidades de alcanzar cada uno de los niveles de actividad. Este cálculo es fácil en función de las probabilidades de los estados ON y OFF de las fuentes simples tipo 2 agregadas:

$$p_{ON} = \frac{c}{c+d} = 0.0154; \quad p_{OFF} = \frac{d}{c+d} = 0.9846 \quad (5.2)$$

De este modo, se pueden obtener las probabilidades de encontrar a la fuente en cada uno de los niveles de actividad:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_{OFF}^2 = 0.9694 \\ p_1 &= 2p_{ON}p_{OFF} = 0.0303 \\ p_2 &= p_{ON}^2 = 0.0002 \end{aligned} \quad (5.3)$$

de donde la capacidad media necesitada será igual a:

$$\bar{C} = \sum_{k=0}^2 p_k C_k = 3202160 \text{ bps} \quad (5.4)$$

Con estos valores, un sencillo método de admisión de nuevas conexiones podría estar basado en la comparación de la capacidad de canal disponible en los enlaces que atravesaría la conexión, con la capacidad media necesaria para todas las conexiones establecidas más la nueva conexión solicitada. Es decir, la nueva conexión sería admitida siempre que:

$$C_{disp} \geq N\bar{C} \quad (5.5)$$

donde N representa el número total de fuentes que se desean multiplexar.

5.2 ASIGNACIÓN DINÁMICA DE RECURSOS A TASA VARIABLE

En esta sección se plantea la renegociación de servicios de tasa variable con la red. De esta forma, dentro de un mismo nivel de actividad de la fuente de vídeo, se podrá aprovechar la ganancia de multiplexación estadística suministrada por las redes ATM. Esto permitirá una mejora en la utilización de recursos de red, que será tanto mayor cuanto más grande sea el número de fuentes multiplexadas

Los cálculos que se llevarán a cabo a lo largo de este trabajo sobre multiplexores estadísticos se realizarán utilizando la aproximación basada en la dinámica de fluidos.

Una presentación detallada de esta teoría aparece en el apéndice. Mediante dicha aproximación, será posible el cálculo de los recursos de red necesarios para proveer una calidad de servicio determinada. Los recursos de red se obtendrán en términos de capacidad de canal y longitud de buffer, mientras que la calidad de servicio se especificará mediante la probabilidad de pérdida y el retardo máximo permitidos. Los valores utilizados para los cálculos han sido los obtenidos mediante el ajuste del modelo MMFP presentado anteriormente.

En primer lugar, se procede al cálculo de la ganancia obtenida mediante la utilización de la renegociación para una única fuente de vídeo, definida como la relación entre la capacidad de canal necesaria para una fuente sin renegociación de recursos y con renegociación de recursos, manteniendo constante la probabilidad de pérdida y el retardo máximo introducido por el multiplexor. En los casos prácticos de transmisión de tráfico de vídeo, lo más interesante es que el retardo de espera en las colas de los multiplexores sea lo más pequeño posible. Así, los cálculos realizados a continuación corresponden al ajuste de la probabilidad de pérdida solicitada en cada caso cuando no hay buffer de almacenamiento (ver apéndice). Como refinamiento, se podría añadir una pequeña cantidad de almacenamiento a la conexión, para solucionar por ejemplo situaciones de contención. Sin embargo, esta capacidad de almacenamiento puede permanecer fija durante toda la conexión, con lo que tan sólo será necesario renegociar la capacidad de transmisión asignada. De este modo, las solicitudes de renegociación se podrían llevar a cabo mediante el campo ER de las celdas RM, tal y como se propuso para el servicio RCBR.

Teniendo en cuenta las consideraciones del párrafo anterior, y tomando una probabilidad de pérdida de 10^{-5} sobre servicio VBR, se obtiene para una fuente de vídeo una capacidad necesaria de:

$$C_1 = 4.54 \text{ Mbps} \quad (5.6)$$

Por otra parte, haciendo uso de la renegociación, la capacidad necesaria puede calcularse obteniendo primero la capacidad C_{N0} del nivel de actividad regular que cumple la calidad de servicio predeterminada, obteniéndose:

$$C_{N0} = 2.7175 \text{ Mbps} \quad (5.7)$$

A continuación, se añaden las capacidades necesarias cuando la fuente pasa a los estados de mayor actividad, teniendo en cuenta la probabilidad de aparición de estos estados:

$$C_{R1} = C_{N0} + (p_1 J + p_2 2J) / T_{Gop} = 2.7655 \text{ Mbps} \quad (5.8)$$

obteniéndose finalmente una ganancia de renegociación para una fuente simple de:

$$G_{R1} = \frac{C_1}{C_{R1}} = 1.64 \quad (5.9)$$

Un cálculo más exacto pasaría por tener también en cuenta en el segundo sumando de la expresión (5.8) la influencia de la probabilidad de pérdida deseada, si bien no va a ser muy apreciable. De la misma forma que en el caso de una fuente simple, se procede para el cálculo de la ganancia de renegociación cuando se multiplexan un número N de fuentes. En primer lugar, se calculan los recursos necesarios sin emplear renegociación, C_N . Posteriormente, se plantea el cálculo de la capacidad necesaria con renegociación, C_{RN} , como:

$$C_{RN} = C_{N0}^{(N)} + \frac{\sum_{k=0}^{2N} p_k kJ}{T_{GoP}} = C_{N0}^{(N)} + \frac{\left[\sum_{k=0}^{2N} \binom{2N}{k} P_{ON}^k P_{OFF}^{(2N-k)} kJ \right]}{T_{GoP}} \quad (5.10)$$

donde cabe hacer la misma afirmación que antes sobre la posibilidad de considerar la probabilidad de pérdida en el segundo sumando. Así, se obtiene la ganancia de renegociación para N fuentes multiplexadas estadísticamente como:

$$G_{RN} = \frac{C_N}{C_{RN}} \quad (5.11)$$

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los cálculos presentados a diferentes números de fuentes multiplexadas se presentan en la tabla 5.4. Fijándonos en las ganancias obtenidas para una probabilidad de pérdida fija, observamos como va decreciendo conforme el número de fuentes multiplexadas aumenta. Está claro que la situación ideal, cuando se utiliza multiplexación estadística, es que el número de fuentes multiplexadas N sea tan grande que baste con que asignemos al grupo de fuentes una capacidad igual a N veces la tasa media de generación de las fuentes por separado. De esta forma se conseguirá la mayor eficiencia posible en la utilización de los recursos. Por tanto, en este tramo, la ganancia de renegociación va decayendo hacia la unidad. Con todo, las prestaciones del sistema con renegociación siempre estarán por encima de las del sistema sin renegociación.

Sin embargo, cuando el número de fuentes multiplexadas es pequeño o mediano, las ventajas del sistema con renegociación son realmente apreciables. Obsérvese como para una sola fuente, la ganancia es de un 40% para una probabilidad de pérdida de 10^{-4} , aumentando hasta un 64% si la calidad del servicio exige una probabilidad de pérdida de 10^{-5} . Se observa que los requisitos de capacidad en los sistemas sin renegociación aumentan más rápidamente que en los sistemas con renegociación al aumentar la calidad de servicio exigida.

En definitiva, y teniendo en mente que la situación ideal con servicios VBR es que haya un número grande de fuentes multiplexadas, con el sistema de renegociaciones se consigue llevar en parte esta situación al tramo en el cual el número de fuentes multiplexadas no es grande. El servicio RVBR aprovecha por tanto las ventajas de la multiplexación estadística mejor que el servicio VBR cuando el tráfico presente

características autosemejantes. En la figura 5.19, se muestra la capacidad por fuente necesaria en servicios con y sin renegociación, para una probabilidad de pérdida de 10^{-5} , comprobándose las afirmaciones anteriores. Además, se incluye el valor medio de generación de una fuente.

N	$C_N (PL=10^{-4})$	$C_{RN} (PL=10^{-4})$	$G_{RN} (PL=10^{-4})$	$C_N (PL=10^{-5})$	$C_{RN} (PL=10^{-5})$	$G_{RN} (PL=10^{-5})$
1	3.7 Mbps	2.64 Mbps	1.397	4.54 Mbps	2.77 Mbps	1.639
2	5.18 Mbps	4.09 Mbps	1.265	6.1 Mbps	4.47 Mbps	1.365
5	8.6 Mbps	7.43 Mbps	1.156	9.85 Mbps	8.34 Mbps	1.181
10	13.6 Mbps	12.42 Mbps	1.095	15.2 Mbps	13.58 Mbps	1.119
30	31.55 Mbps	28.97 Mbps	1.089	33.95 Mbps	30.98 Mbps	1.096

Tabla 5.4. Ganancia con renegociación sobre VBR para N fuentes multiplexadas

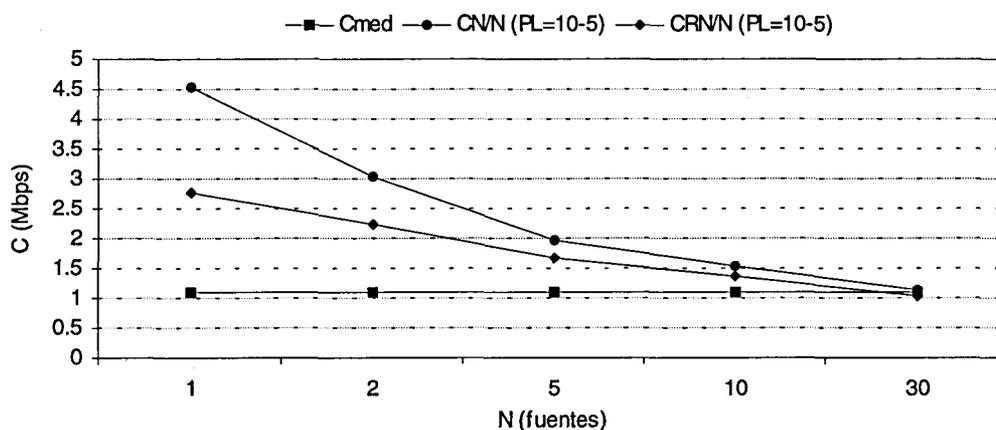


Figura 5.19. Capacidad por fuente, con y sin renegociación, para $P_L=10^{-5}$

6 Resultados experimentales

6.1 SERVICIO SIN POSIBILIDAD DE RENEGOCIACIÓN

A continuación se pasa a presentar los resultados obtenidos mediante simulación sobre las prestaciones del interfaz propuesto, utilizando trazas de tráfico real. En primer lugar, y para comprender mejor su funcionamiento, se trabajará sobre una red que no permitirá la renegociación de tasa, con lo cual el interfaz se verá obligado a mantener siempre dentro del nivel de actividad regular al codificador. Para ello, regulará el valor de Q de la forma estudiada en apartado anterior.

La simulación de este modo de funcionamiento se llevó a cabo sobre la secuencia "Jurassic Park". Un fragmento de esta secuencia, junto con la salida obtenida del interfaz propuesto, se presenta en la figura 5.20. Se ha escogido un fragmento en el cual se produce una brusca transición entre el estado de actividad regular y el de gran

actividad. Como se observa, el funcionamiento del interfaz es correcto, suavizando y corrigiendo la transmisión de la secuencia.

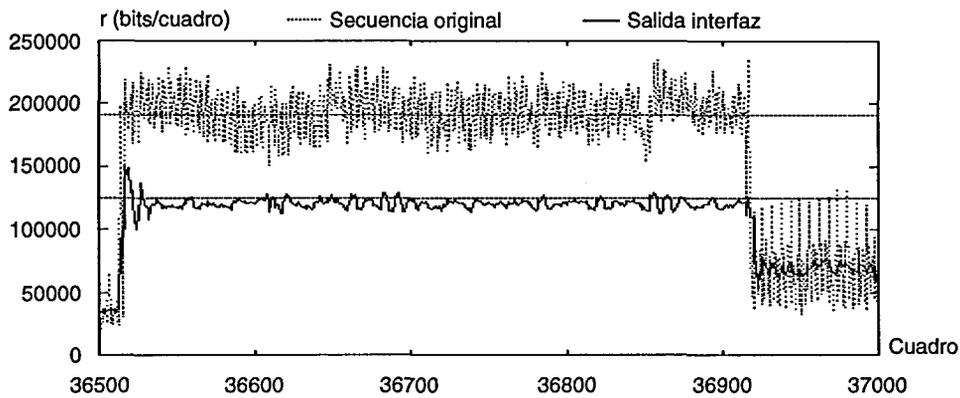


Figura 5.20. Suavizado y corrección de tasa durante un intervalo de gran actividad no admitido por la red

La variación del factor de cuantificación se presenta en la figura 5.21 para el mismo tramo de la secuencia. El valor nominal de Q utilizado ha sido igual a 6. Además, en la figura 5.22 se representa la variación de calidad objetiva, en términos de PSNR, obtenida mediante la relación [Mat96]:

$$PSNR = 45.879 \cdot Q^{-0.1} \tag{5.12}$$

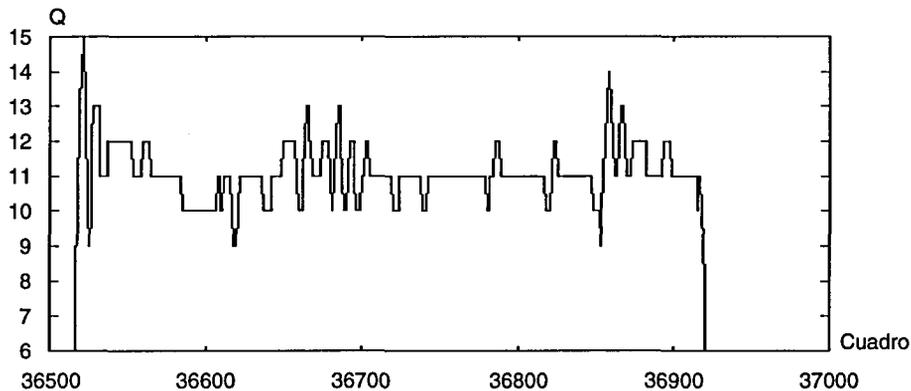


Figura 5.21. Evolución del parámetro Q sin posibilidad de renegociación

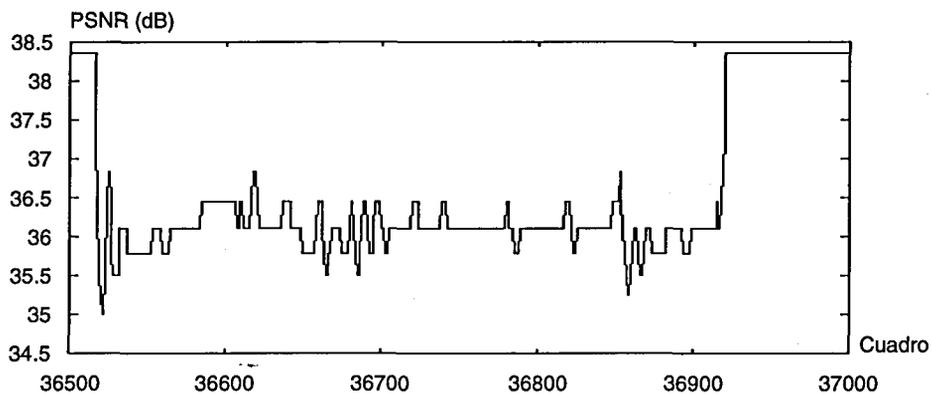


Figura 5.22. Variación de la calidad objetiva provocada por las variaciones de Q

El número de ocasiones en que el valor de Q se vea obligado a permanecer por encima del valor nominal, nos dará por tanto una idea de los momentos en los que se

está degradando la calidad de la imagen. Así, un análisis de la evolución global de dicho parámetro será de utilidad para comprobar el mantenimiento de la calidad a lo largo de toda la transmisión. Para observar dicha evolución, en la figura 5.23 se presenta el histograma completo del parámetro Q para la secuencia estudiada. Dado que la mayor parte de las ocasiones, al permanecer la fuente en su estado de actividad regular, el valor de Q será precisamente su valor nominal, el valor del histograma en este punto es mucho mayor que en el resto. Por ello, se ha utilizado una representación semilogarítmica del histograma.

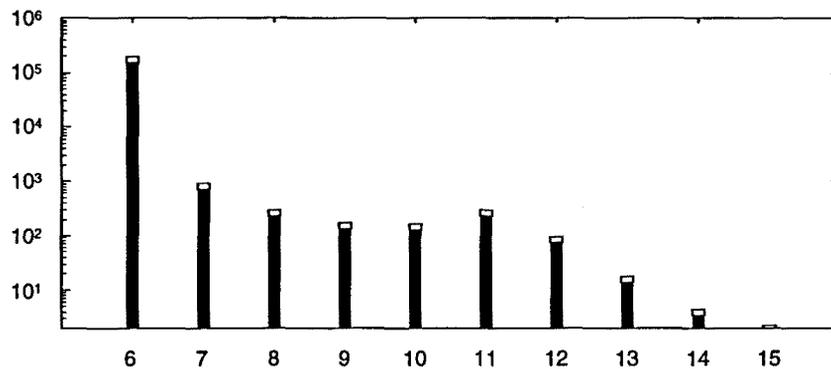


Figura 5.23. Histograma del parámetro Q sin posibilidad de renegociación

Por tanto, en la situación presentada, el interfaz mantendrá siempre a la fuente en el estado de actividad regular. El número de solicitudes de renegociación denegadas durante la secuencia completa fue de 257. Para comprender mejor este dato, se debe tener en cuenta que, cuando una solicitud es rechazada, el interfaz puede decidir entre varias opciones. La primera de ellas consiste en volver a solicitar inmediatamente la renegociación. Sin embargo, es muy probable que las condiciones de la red no hayan cambiado prácticamente, con lo que la solicitud volvería a ser rechazada. Este proceso podría llevar a una carga demasiado elevada de solicitudes de renegociación por parte de múltiples fuentes, haciendo crecer innecesariamente el tráfico de señalización y el tiempo de proceso dedicado en los conmutadores. Otra posibilidad estaría en esperar un tiempo predeterminado antes de volver a solicitar la renegociación, de forma que sea probable que la carga en los circuitos implicados en la conexión haya descendido y por tanto sea posible la asignación de nuevos recursos. Este tiempo podría estar fijado a un valor constante, o escogerse de forma aleatoria entre unos márgenes determinados. Finalmente, se puede optar por no volver a solicitar la renegociación hasta que se produzca una nueva transición entre niveles de actividad. Para el caso tratado en este apartado, al no ser posible la renegociación bajo ningún concepto, esta última fue la posibilidad adoptada. De haber sido cualquiera de las otras dos, el número de transiciones solicitadas, y denegadas, habría sido evidentemente mayor.

En el apartado anterior, se comprobó como el sistema se adaptaba correctamente a las transiciones bruscas de tasa cuando el conformador utilizado era el predictivo. Por

tanto, este ha sido el controlador utilizado en todas las simulaciones comentadas en este apartado. Así, en este momento podemos corroborar el buen funcionamiento del sistema en situaciones sin posibilidad de renegociación y tráfico real. Como última comprobación, en la figura 5.24 se muestran las tasas a la salida de cada uno de los elementos, para la parte inicial de la figura 5.20, en la cual se produce el cambio brusco de subida.

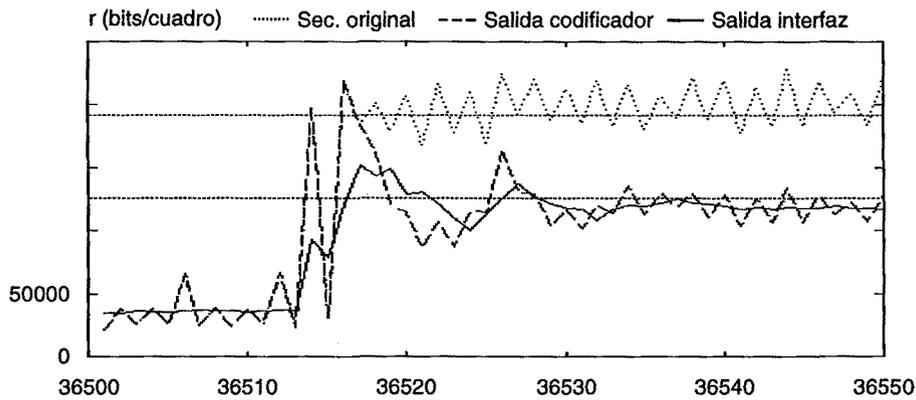


Figura 5.24. Estabilidad del valor de la tasa a la salida del codificador y del interfaz

6.2 SERVICIO SIN BLOQUEO NI DEMORA DE RENEGOCIACIÓN

En el siguiente estudio se trabajará sobre el caso particular de que las renegociaciones sean siempre admitidas por la red, y además de forma inmediata. Es decir, el supervisor controlador no se verá obligado en ningún momento a modificar el valor de Q del codificador MPEG. Como consecuencia, el nivel de actividad irá variando libremente, como se muestra en la figura 5.25, mientras que el parámetro de cuantificación permanecerá en su valor nominal Q , dando lugar a una transmisión de calidad constante.

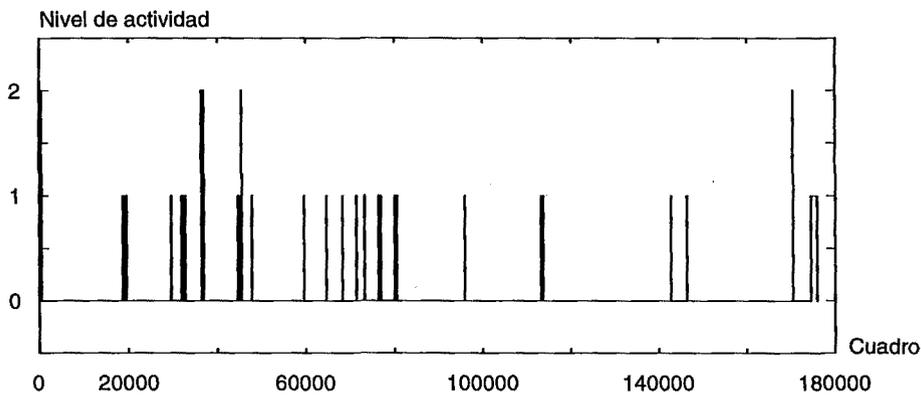


Figura 5.25. Evolución temporal del nivel de actividad para la serie completa "Jurassic Park"

De este modo, la salida del interfaz será igual a la salida suavizada por el conformador predictivo. El retardo introducido previo al acceso a la red quedará, por tanto, limitado por el retardo máximo configurado en dicho conformador. El

funcionamiento del interfaz, para la misma sección de la secuencia “Jurassic Park” mostrada en el apartado anterior, aparece en la figura 5.26.

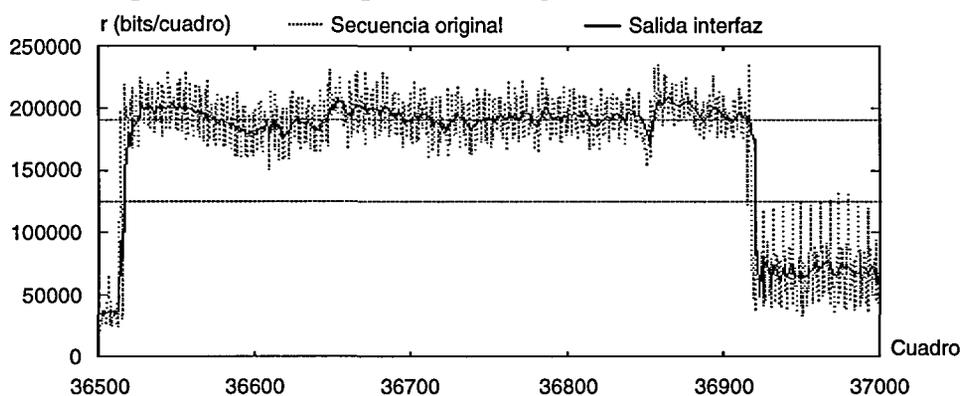


Figura 5.26. Salida del interfaz con renegociación admitida de forma inmediata

Para la secuencia bajo estudio, el número total de transiciones solicitadas y aceptadas fue de 58. Teniendo en cuenta que la longitud total de la secuencia es de 175752 cuadros, el número de transiciones obtenido representa un tiempo medio entre transiciones de algo más de dos minutos para sistemas a 25 cuadros por segundo. Analizando con un poco más de detalle este tiempo se obtuvo el histograma que se presenta en la figura 5.27. La unidad de tiempo empleada vuelve a ser el tiempo de cuadro. Como consecuencia fundamental se observa que las renegociaciones se llevan a cabo en la mayoría de los casos en un intervalo de tiempo inferior a 500 cuadros, lo cual equivale a 20 segundos. Sin embargo, y aunque poco frecuentes, en ocasiones el tiempo entre transiciones puede crecer bastante. Este tipo de distribución se repite en varias de las secuencias analizadas, como se puede observar en las figuras 5.28 y 5.29, correspondientes a las series “Geografía de Cataluña” y “Neil Young”.

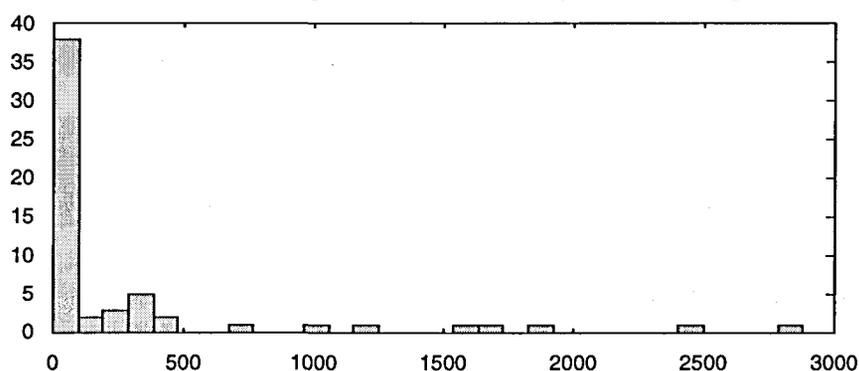


Figura 5.27. Histograma del tiempo entre solicitudes de renegociación. Serie “Jurassic Park”

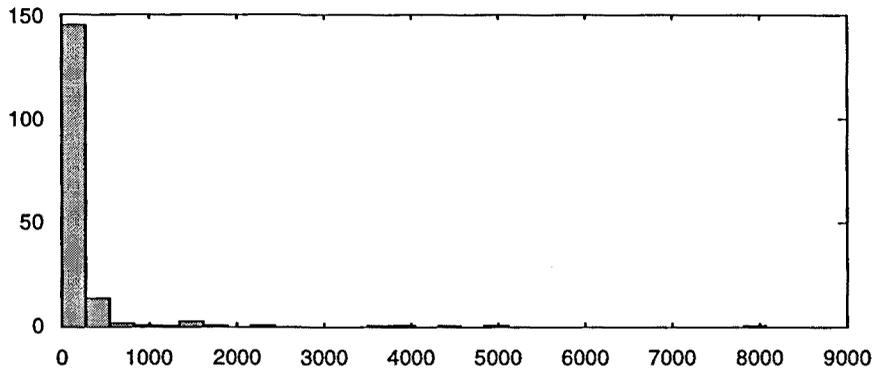


Figura 5.28. Histogramas del tiempo entre solicitudes de renovación. Serie "Geografía de Cataluña"

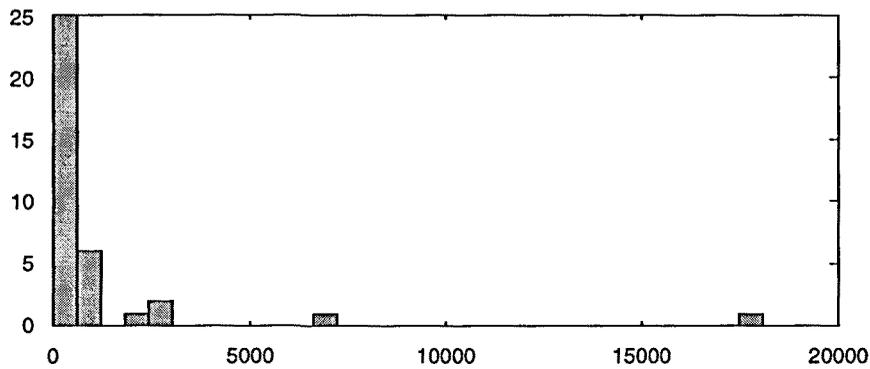


Figura 5.29. Histogramas del tiempo entre solicitudes de renovación. Serie "Neil Young"

A continuación se analizan los tiempos de permanencia en cada uno de los estados por separado. Para ello, los histogramas asociados a cada nivel de actividad, se presentan en las figuras 5.30, 5.31 y 5.32 para los estados 0, 1 y 2 respectivamente. La secuencia de estudio presentada es nuevamente "Jurassic Park". Como era de esperar, los tiempos de permanencia más elevados corresponden al nivel de actividad regular, seguidos del nivel de actividad elevada. Además, para todos los estados, las distribuciones se acumulan en las cercanías del origen, pero siempre aparecen eventos en posiciones bastante alejadas. La aparición de estos tiempos de permanencia elevados en ocasiones para todos los estados corrobora los estudios llevados a cabo en el capítulo 3 acerca de la autosemejanza o fractalidad del tráfico de vídeo VBR.

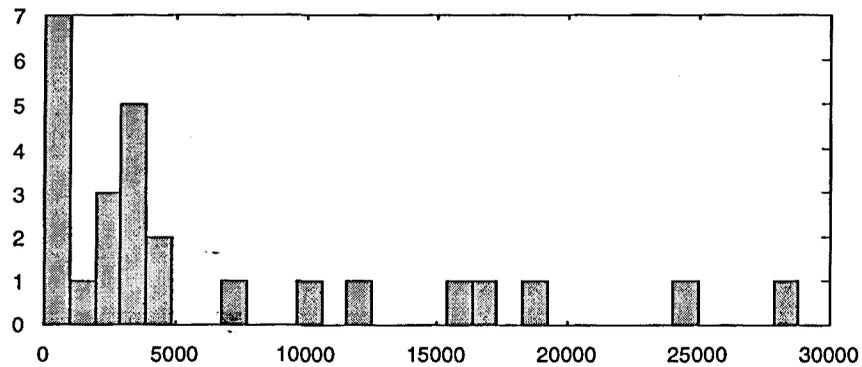


Figura 5.30. Histograma del tiempo de permanencia en el estado de actividad regular

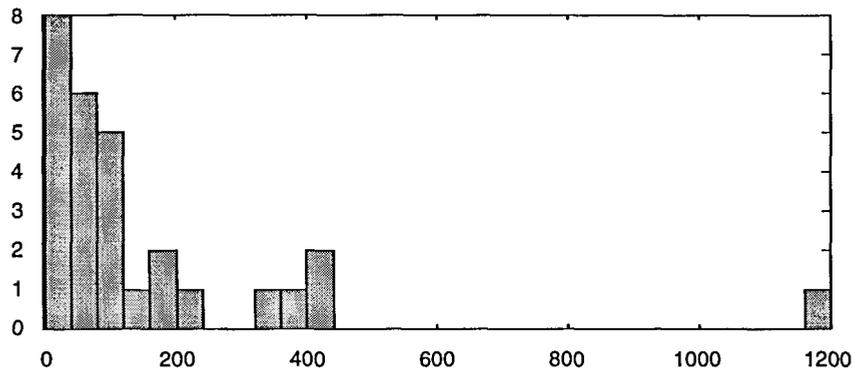


Figura 5.31. Histograma del tiempo de permanencia en el estado de actividad elevada

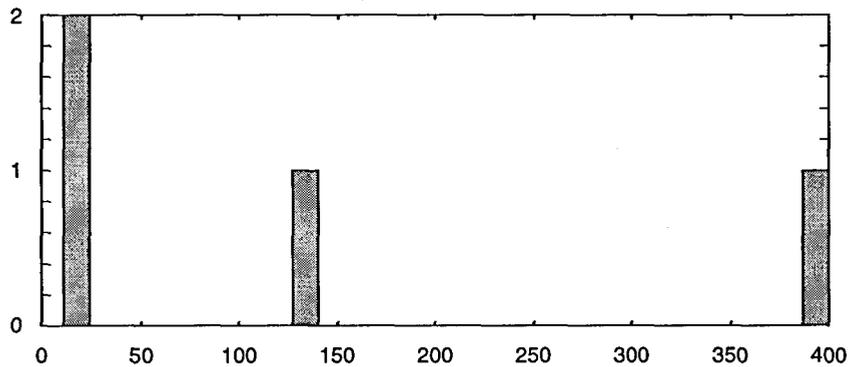


Figura 5.32. Histograma del tiempo de permanencia en el estado de gran actividad

Los resultados presentados en las gráficas se completan con los que aparecen en las tablas 5.5 y 5.6. En la primera de ellas se presentan resultados referentes al número de transiciones para distintas series de tráfico real, en particular el número total de transiciones solicitadas y aceptadas, el número medio de cuadros y el tiempo medio entre transiciones (como siempre, para un sistema a 25 cuadros por segundo). Es de notar que este tiempo es generalmente elevado, detalle que corrobora que las solicitudes de renegociación a la red se incluyan dentro de un nivel temporal de llamada. Con referencia al modelo MMFP bidimensional presentado, estos altos tiempos de permanencia en un estado se corresponden con las bajas tasas obtenidas para la transición entre los estados correspondientes a distintos niveles de actividad. Profundizando un poco más, se obtienen los valores referentes a cada estado de actividad en particular, los cuales se detallan en la segunda tabla. Aquí se vuelve a comprobar como la mayor parte del tiempo las fuentes se encuentran en el estado de actividad regular, pasando en una proporción significativa al estado de actividad alta, y con mucha menos frecuencia al estado de gran actividad.

Secuencia	Longitud (cuadros)	Total	C (cuadros)	T (segundos)
Jurassic Park	175752	58	2979	119.2
G.Cataluña	51000	173	293	11.7
Mid. Murders	39935	16	2349	94.0
Neil Young	47981	36	1297	51.9

Tabla 5.5. Transiciones entre niveles de actividad

Secuencia	Actividad regular				Actividad elevada				Gran actividad			
	Total	%	C	T	Total	%	C	T	Total	%	C	T
Jurassic Park	170771	97.17	6567	262.7	4415	2.51	158	6.32	566	0.32	142	5.68
G.Cataluña	44600	87.45	556	22.2	5513	10.81	64	2.6	887	1.74	55	2.2
Mid. Murders	39302	98.41	4495	179.8	633	1.59	79	3.16	0	0	-	-
Neil Young	43168	89.97	2192	87.7	4496	9.37	250	10	317	0.66	317	12.7

Tabla 5.6. Permanencia en los distintos estados de actividad

En este momento, es posible realizar una cuantificación basada en los experimentos de las ventajas que van a suponer los sistemas con asignación dinámica de ancho de banda frente a los sistemas con asignación estática. Como ya se ha comentado, utilizando un servicio con ancho de banda constante, se deberían asignar a la conexión los recursos necesarios para mantener la calidad de servicio en el peor de los casos, es decir, cuando la fuente se encuentra en el estado de gran actividad. De los valores de la tabla 5.xx, se deduce que una fuente clásica de vídeo comprimido sólo va a pasar en este estado una fracción muy pequeña del tiempo, con lo cual los recursos asignados se van a desaprovechar en una gran medida.

Por el contrario, utilizando un servicio con renegociación, el aprovechamiento de los recursos será mucho mejor. Una posible medida del aprovechamiento se puede llevar a cabo estudiando el factor de utilización de los canales asignados durante la conexión. Esta medida se propone en [GroKes97] como eficiencia de ancho de banda, expresada de la siguiente manera:

$$\eta_{BW} = \frac{\sum_{i=1}^L r_i}{\sum_{i=1}^L s_i} \tag{5.13}$$

donde L representa el número total de cuadros transmitidos durante la conexión, r_i la tasa necesaria para cada cuadro y s_i la capacidad asignada. Así, si para cada cuadro asignásemos una capacidad exactamente igual a la necesitada, la eficiencia en ancho de banda sería del 100%. Por ejemplo, en [Ada96] se presenta un método de renegociación para el cual el autor supone que la red siempre va a tener disponible y va a asignar exactamente la capacidad necesitada para cada cuadro. De esta forma, la eficiencia en ancho de banda es cercana a la unidad, pero evidentemente esta propuesta está

exigiendo demasiado al servicio, ya que conlleva, aparte de la disponibilidad de la red, una renegociación para cada cuadro de la secuencia.

En la tabla 5.7 se muestra la comparación de la eficiencia en ancho de banda utilizando un servicio clásico CBR a tasa de pico, un servicio VBR y los servicios propuestos RCBR y RVBR con tres niveles de actividad (3-RCBR y 3-RVBR). En ella se observa una mejora sustancial en la eficiencia para todas las secuencias utilizadas en las simulaciones. Los valores aplicados para la asignación de canal resultan del número de cuadros que cada secuencia pasa en cada estado de actividad en las simulaciones anteriores. En cada uno de estos estados, la capacidad asignada ha sido la capacidad de pico correspondiente en los servicios CBR y 3-RCBR. Si bien estas simulaciones se han llevado a cabo sin bloqueo de renegociaciones, los resultados obtenidos son muy válidos dado que generalmente esta probabilidad de bloqueo va a ser baja si se ha llevado a cabo un correcto control de admisión de llamadas. Además, tener una probabilidad no nula de bloqueo implicará que en ocasiones se reducirá la tasa de la fuente para adaptarla a la disponibilidad de canal, con lo cual la eficiencia en ancho de banda sería mayor. Sin embargo, la calidad de servicio prestada sería inferior. Para los resultados presentados con los servicios VBR y 3-VBR se han tomado los valores de capacidad necesarios para una única fuente y probabilidad de pérdida de 10^{-4} . La eficiencia obtenida crecerá cuando el número de fuentes multiplexadas sea mayor. Además, este crecimiento será más rápido en el servicio 3-VBR que en el clásico VBR sin renegociación.

Secuencia	η_{BW} (CBR)	η_{BW} (VBR)	η_{BW} (3-RCBR)	η_{BW} (3-RVBR)
Jurassic Park	17.72 %	29.89 %	34.96 %	41.74 %
G. de Cataluña	23.9 %	40.32 %	44.70 %	53.5 %
Mid. Murders	17.41 %	29.58 %	34.63 %	41.42 %
Neil Young	26.95 %	45.46 %	51.26 %	60.79 %

Tabla 5.7. Eficiencia en ancho de banda para servicios CBR, VBR, 3-CBR y 3-VBR

6.3 SERVICIO SIN BLOQUEO CON DEMORA DE RENEGOCIACIÓN

En este apartado se trabaja sobre una posibilidad más realista de servicio, en la cual se pasa a tener en cuenta el retardo que existirá entre el momento en que se solicita la asignación de nuevos recursos y el momento en que son definitivamente asignados.

En algunos trabajos previos, como [ReiRay96], este retardo de renegociación se supone constante e igual a 100 ms. En otros estudios, se comenta la posibilidad de que este retardo sea variable, en función de la distancia geográfica que abarque la conexión. Por ejemplo, en [ZhaKni97] se proponen valores de milisegundos para conexiones en entorno LAN, decenas de milisegundos para conexiones en entorno WAN (por ejemplo,

dentro de un mismo continente), y de centenas de milisegundos para conexiones en redes globales.

Para las simulaciones llevadas a cabo en este apartado se trabajará con un retardo de renegociación variable, tomando como unidad básica de tiempo el tiempo de cuadro. Es decir, el interfaz verá reconocida su solicitud de recursos en un tiempo aleatorio, y comenzará a utilizarlos para la transmisión del siguiente cuadro. De esta forma, el retardo de renegociación será variable entre un número determinado de cuadros. Los valores escogidos han sido 1 y 4 cuadros, lo que supone un retardo en la renegociación entre 40 y 160 milisegundos.

El funcionamiento del mecanismo de renegociación queda de la siguiente manera. Cuando se necesitan más recursos, se solicitan a la red, la cual los reconocerá en un tiempo dentro del margen indicado. Por el contrario, cuando se pueden liberar recursos, al pasar de un nivel de actividad más alto a otro más bajo, se renegocia de la misma forma con la red, pero no se espera a obtener el reconocimiento, que siempre será positivo. Es decir, desde el mismo instante que no se necesitan los recursos, se dejan libres. De esta forma, cuando la renegociación se lleve a cabo sobre canales de tasa variable, los recursos quedan desde el principio disponibles para otra conexión que los necesitare.

Las simulaciones sobre este tipo de servicios se llevaron a cabo en primer lugar para la secuencia "Jurassic Park". La representación gráfica de la evolución del factor Q durante toda la transmisión de la secuencia, y la consiguiente variación de calidad, se muestran en las figuras 5.33 y 5.34 respectivamente. En ellas puede observarse como el valor máximo de Q es igual a 12, inferior a la cota máxima en sistemas sin renegociación que se situaba en un valor de 15. De este modo, la calidad objetiva de la imagen, en un sistema simulado que es ya muy parecido a un sistema real, no baja por debajo de los 35.5 dB.

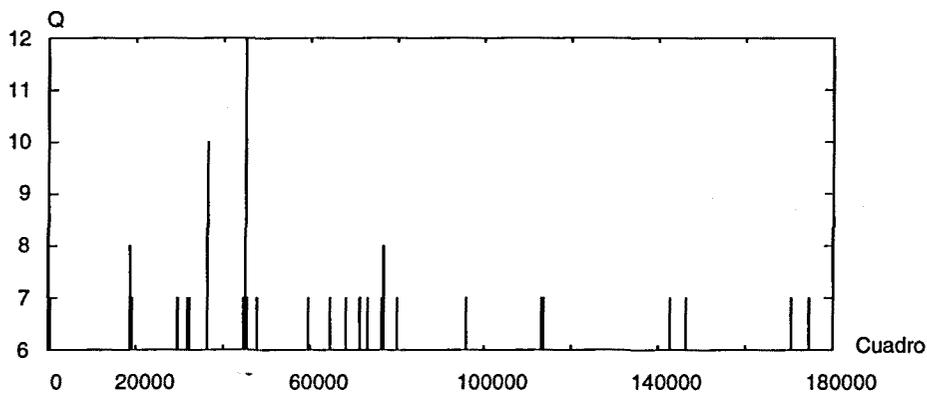


Figura 5.33. Evolución de Q para la serie completa "Jurassic Park" con renegociación y demora

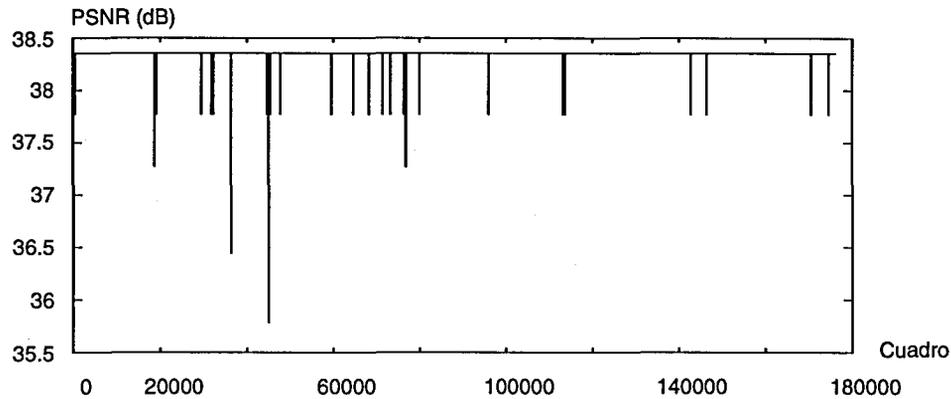


Figura 5.34. Evolución de la PSNR para la serie completa "Jurassic Park" con renegociación y demora

Con objeto de obtener una comparación entre los valores de Q obtenidos durante las simulaciones sin posibilidad de renegociación y las realizadas en este apartado, en la figura 5.35 se presenta la evolución de este parámetro, pero para un pequeño fragmento de la transmisión, de 50 cuadros de longitud, de forma que sea posible analizar las diferencias. El fragmento escogido se corresponde con la misma transición de subida presentada en la figura 5.24. En la figura se observa como, tras el inicio de la renegociación, el factor Q aumenta en ambos casos. Sin embargo, al no estar permitida la renegociación, este factor permanecerá alto hasta que el nivel de actividad de la fuente vuelve a bajar. Recuerdese que para esta simulación se mantenía a la fuente siempre en el nivel de actividad regular. Por el contrario, en el servicio con renegociación, la red proporciona nuevos recursos y el factor Q puede volver a bajar hasta su valor nominal, proporcionando de nuevo la calidad de imagen deseada.

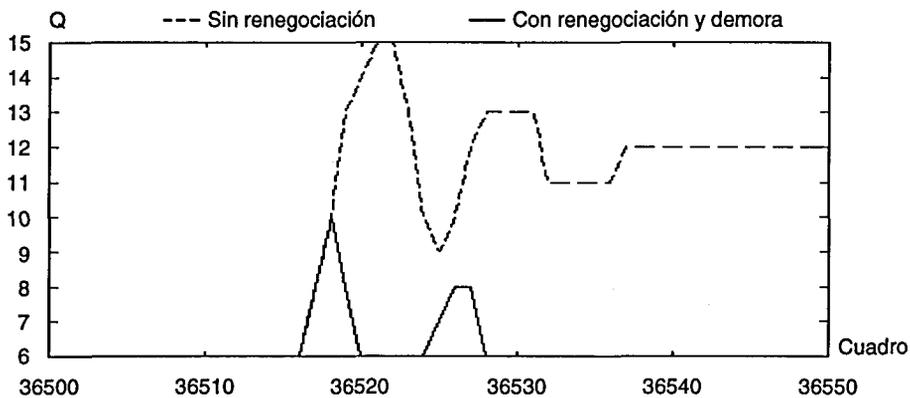


Figura 5.35. Comparación del factor Q en servicios con renegociación y sin renegociación

En cuanto a la eficiencia en ancho de banda, los resultados son muy parecidos a los obtenidos en el apartado anterior, cuando no se tenía en cuenta la posibilidad de demora en la renegociación. Como ya se comentó, la única diferencia se presenta en los instantes en que hay que esperar la asignación de nuevos recursos. Sin embargo, durante estos instantes, la tasa entregada a la red se ajusta aún más a la capacidad disponible, con lo cual el factor de utilización del enlace será mayor. Así, la eficiencia en ancho de

banda será levemente mayor, a costa de un descenso en la calidad de la imagen durante los instantes de demora.

6.4 AJUSTE DE LOS UMBRALES DE TRANSICIÓN

Como último experimento, se comprobó la bondad del ajuste entre los niveles de transición proporcionado por el modelo MMFP bidimensional. Dicha comprobación se realizó de manera completamente heurística, tras la observación de que el porcentaje de tiempo que las fuentes pasan en el nivel de actividad regular es muy elevado. Para ello, se varió el nivel de los umbrales de transición del SC en el margen comprendido entre el -30% y el +20%.

El parámetro a observar en este momento es el número de transiciones, ya que si se hace demasiado elevado, la aplicación de este sistema perdería interés. Esto implicaría además un incremento en el tiempo de proceso dedicado a estas tareas en los conmutadores. Además, es posible que los operadores de red añadan un coste adicional a este tipo de servicios en función del número de renegociaciones. De este modo, se llega a un compromiso entre una posible mayor eficiencia de utilización de recursos con el aumento del número de solicitudes de renegociación de ancho de banda.

Los resultados experimentales obtenidos para las secuencias bajo estudio se muestran en la tabla 5.8. Se observa claramente como el número de transiciones aumenta al bajar los niveles, con lo que el tiempo medio entre renegociaciones se hace menor. Por otro lado, aumentar el valor de los niveles de transición implica un aumento en el tiempo medio entre renegociaciones.

Secuencia	Longitud (cuadros)	Umbrales MMFP		Umbrales +10 %		Umbrales +20 %	
		Total	T (segundos)	Total	T (segundos)	Total	T (segundos)
Jurassic Park	175752	58	119.2	32	213.0	14	468.7
G.Cataluña	51000	173	11.7	142	14.3	106	19.1
Mid. Murders	39935	16	94.0	4	319.5	2	532.5
Neil Young	47981	36	51.9	20	91.4	10	174.5

Secuencia	Longitud (cuadros)	Umbrales -10%		Umbrales -20%		Umbrales -30%	
		Total	T (segundos)	Total	T (segundos)	Total	T (segundos)
Jurassic Park	175752	83	83.7	138	50.6	249	28.1
G.Cataluña	51000	237	8.6	314	6.5	370	5.5
Mid. Murders	39935	30	51.5	36	43.2	70	22.5
Neil Young	47981	46	40.8	65	24.1	133	14.3

Tabla 5.8. Comparación del número de transiciones para distintos umbrales

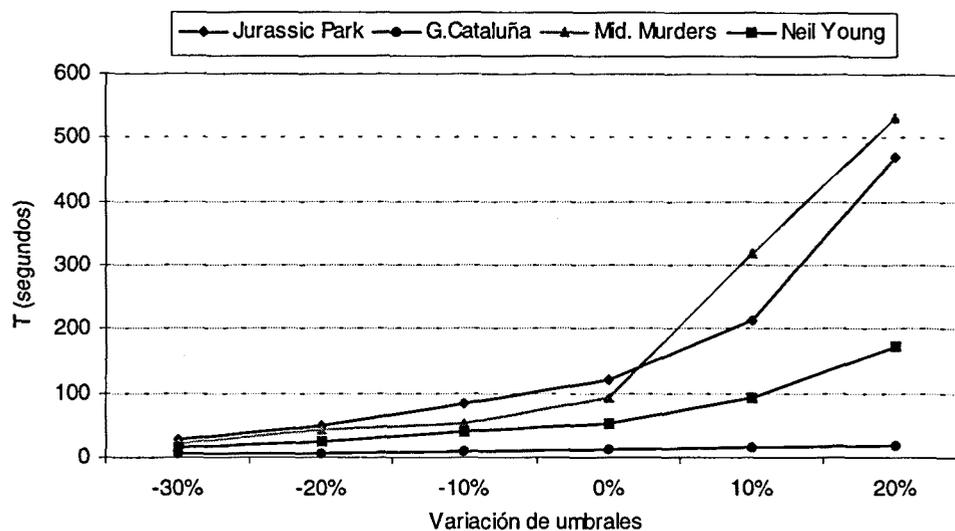


Figura 5.36. Tiempo medio entre transiciones con variación de umbrales entre niveles de actividad

En la figura 5.36 se muestra la evolución de los valores de la tabla 5.8. Como puede observarse, aumentar el valor de los umbrales de transición provoca una fuerte subida en el tiempo entre transiciones. Si bien a nivel de gestión este hecho podría ser beneficioso, está claro que no será así a nivel de la eficiencia buscada en la utilización de recursos. Por otra parte, al reducir el valor de los niveles la variación en el valor del tiempo entre transiciones es mucho más lenta. Esto nos lleva a la conclusión de que el modelo utilizado captura adecuadamente el valor sobre el que han de moverse los umbrales. Una posible mejora consistiría en la implementación de algún sistema de control para llevar a cabo una adaptación dinámica de los niveles, en función del número de transiciones que se vaya midiendo. Además, como se observa en la figura, hay secuencias que se apartan claramente del comportamiento general. Para estas secuencias, el sistema adaptativo sería aún de más ayuda.

7 Conclusiones

En este capítulo se han analizado las ventajas que suponen los servicios con asignación dinámica de ancho de banda respecto a los clásicos servicios CBR y VBR. Para ello, se ha llevado a cabo en primer lugar un repaso de las técnicas más actuales presentadas dentro de este campo. Estas técnicas consisten básicamente en la renegociación de servicios CBR y VBR a lo largo de una conexión.

En las propuestas de estos servicios, uno de los aspectos fundamentales es la elaboración del mecanismo de solicitud de renegociaciones. Es decir, se deben solucionar las siguientes cuestiones:

- ¿Cuándo una fuente solicitará una variación en la cantidad de ancho de banda que tiene asignada?
- ¿Cómo llevará a cabo esta solicitud?

- ¿Cuántos recursos solicitará o liberará?

En este trabajo se ha propuesto una solución para estas cuestiones, basada en la identificación de tres niveles de actividad en las secuencias de vídeo. Estos niveles, que se han denominado de actividad regular, elevada y gran actividad, se obtienen del modelado previo del tráfico MPEG VBR a nivel de GoP.

El modelo ajustado es un modelo de fluidos bidimensional. La primera de las dimensiones se encarga de ajustar las dependencias a corto plazo existentes en el tráfico MPEG VBR. Así, las transiciones entre los distintos estados dentro de esta dimensión son bastante frecuentes. Por otra parte, la segunda de las dimensiones se encarga de modelar las dependencias a largo plazo. Cada uno de los estados de esta dimensión da lugar a un nivel de actividad distinto. Así quedan modelados los cambios bruscos entre escenas con distinta complejidad, los cuales provocan grandes cambios en la tasa de salida del codificador. Al contrario con lo que ocurría en las transiciones entre estados dentro de la primera dimensión, en este caso las transiciones son mucho menos probables.

Una vez identificados los niveles de actividad y los umbrales de transición entre ellos, se ha implementado un elemento supervisor y controlador, encargado de la renegociación de ancho de banda con la red y del control de la tasa a la que la información es entregada. Este control se realiza mediante la regulación de la tasa de salida del codificador. De esta forma, en este mismo elemento se han incluido las funciones de policía local necesarias para no sobrepasar en ningún momento el contrato establecido con la red. La corrección de tasa se ha implementado mediante una relación de incrementos entre la tasa de entrada y el máximo permitido en cada nivel por un lado, y el incremento del parámetro de cuantificación Q del codificador MPEG por otro. El correcto funcionamiento del sistema propuesto ha sido comprobado a través de una secuencia de pruebas que pone al controlador en condiciones extremas de funcionamiento.

El último paso en la definición del interfaz buscado para las fuentes de vídeo MPEG VBR ha consistido en la combinación del elemento supervisor controlador con el conformador de tasa propuesto en el capítulo anterior. De esta forma, el conformador aumenta la eficiencia en la utilización de los recursos de la forma comprobada anteriormente, y el supervisor controlador se suma a esa función mediante la renegociación del ancho de banda asignado. Al introducir el conformador en la planta a controlar, se produce un retardo que puede provocar la inestabilidad. Este funcionamiento ha sido comprobado al pasar la secuencia de pruebas por el interfaz propuesto, cuando el conformador de tasa utilizado era uno de los clásicos basados en almacenamiento. Sin embargo, utilizando el conformador predictivo, su rápida

adaptación a los cambios de tasa provoca que el sistema converja a una situación estable y correcta de funcionamiento con un controlador simple.

Como comprobación teórica, en este momento se ha efectuado una cuantificación analítica de las ventajas que suponen los sistemas con renegociación, especialmente cuando trabajan sobre servicios de tasa variable. En particular, se ha comprobado como este tipo de renegociación es especialmente efectivo para obtener las ventajas ofrecidas por la multiplexación estadística, aún en el caso de que el número de fuentes multiplexadas sea reducido. La mejora obtenida respecto al servicio VBR clásico es mayor conforme se reducen las fuentes a multiplicar.

Finalmente, se ha llevado a cabo una comprobación experimental de las conclusiones apuntadas con anterioridad. Para ello, se han simulado distintas situaciones, en función de la disponibilidad o no de recursos para llevar a cabo las renegociaciones de ancho de banda. Con estos experimentos, se ha comprobado en primer lugar el correcto funcionamiento del interfaz propuesto con tráfico real y en situaciones extremas de funcionamiento. Además, se han obtenido de nuevo las ventajas proporcionadas por los sistemas con renegociación, las cuales han sido cuantificadas en términos de eficiencia en ancho de banda.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

“Los documentos se vuelven cada vez más multimedia. Esta tendencia comenzó hace años, cuando los computadores comenzaron a influenciar los documentos. Al principio, la influencia afectó sólo al formato, pero desde hace 10 años comenzaron a incorporar elementos multimedia ...”

“¿Cómo será la próxima generación de vídeos o películas, cuando coexistan múltiples flujos de texto, audio y vídeo?...”

“Una cosa está clara: tus nietos se preguntarán cómo alguien podía leer algo tan aburrido como un documento conteniendo sólo texto.”

Ramesh Jain, en *IEEE Multimedia Magazine*, Julio – Septiembre 1998

1 Conclusiones

Dentro de los servicios que en un futuro muy próximo estarán entre los más solicitados por los usuarios de redes de comunicaciones, se encuentran aquellos que incorporan la transmisión de información de vídeo. Esta información debe ser comprimida antes de entregarla a la red, presentándose el algoritmo MPEG como el de más proyección actual y futura para la realización de esta tarea. La tasa binaria generada por este tipo de codificadores es por naturaleza variable. Por otra parte, la B-ISDN, al estar basada en el modo de transferencia asíncrono, soporta adecuadamente servicios a tasa variable. Si bien en la actualidad la mayor parte de las transmisiones de vídeo se hacen sobre canales a tasa constante, un gran número de trabajos ponen de manifiesto la idoneidad de la utilización de canales a tasa variable. Así, este trabajo ha estado enfocado en la transmisión de tráfico de vídeo de tasa variable sobre redes de comunicaciones de banda ancha, utilizando canales de tasa variable.

La primera tarea realizada ha consistido en la presentación del escenario de trabajo. En este sentido, se ha llevado a cabo una breve presentación de un sistema de transmisión de vídeo sobre una red de comunicaciones, comentando las cuestiones y problemas generales de los sistemas de este tipo. Posteriormente, se han analizado las técnicas más extendidas actualmente para la codificación de información de vídeo, con una atención especial a las empleadas por el algoritmo de codificación MPEG-2. Este algoritmo ha sido introducido a continuación, seguido de los conceptos fundamentales de la B-ISDN y del ATM. También ha sido tratado el problema de la última milla, o cómo llevar la información desde las centrales locales de conmutación hasta los usuarios finales. Finalmente, dentro de esta primera tarea de introducción al problema abordado, se han presentado algunos de los sistemas particulares actualmente desarrollados o en proceso de desarrollo para la transmisión de tráfico de vídeo sobre redes ATM, como por ejemplo el servicio VoD del ATM Forum, la recomendación J.82 de la ITU-T o las especificaciones DAVIC.

La siguiente tarea ha consistido en la caracterización del tráfico sobre el que se iba a trabajar. Principalmente, se trataba de obtener un conocimiento suficiente sobre el proceso descrito por la secuencia de tasas binarias generada por el codificador MPEG. Una de las características más importantes de este tipo de procesos es la presencia de dependencias tanto a corto como a largo plazo. Las primeras han sido tradicionalmente tenidas en cuenta. Resultados de ello han sido, por ejemplo, modelos ARMA para el tráfico de vídeo a nivel de cuadro, o modelos de fluidos binomiales para el mismo tráfico a nivel de GoP o a nivel de escena. Por otra parte, es muy actual el estudio de las dependencias a largo plazo o LRD. Varios trabajos de investigación demuestran que, si la LRD no es tenida en cuenta, la dimensión de nodos y enlaces en las redes de

conmutación de paquetes es, en general, demasiado optimista. Ello es debido fundamentalmente a la posibilidad de aparición de largas ráfagas de tráfico elevado, que contribuirían notablemente al aumento de la probabilidad de pérdida en multiplexores y conmutadores.

De este modo, en esta parte de la Tesis se ha trabajado sobre los procesos autosemejantes. Entre las características de estos procesos está el lento decaimiento de la función de autocorrelación, es decir, la presencia de LRD. Se han estudiado las definiciones existentes para estos procesos, y los métodos gráficos de análisis del grado de autosemejanza presente en un proceso. Este grado de autosemejanza se mide mediante el parámetro de Hurst, H , que presentará valores superiores a 0.5 e inferiores a la unidad. Un valor del parámetro H igual a 0.5 indica la ausencia de LRD.

Por otra parte, se han introducido los métodos más clásicos para la generación artificial de tráfico autosemejante: el algoritmo de Hoskings y el algoritmo RMD. Ambos métodos presentan serios inconvenientes a la hora de ser utilizados en tiempo real con objeto de conducir simulaciones. En particular, el primero de ellos necesita el uso de todas las muestras anteriores generadas, con un tiempo de computación para la generación de cada nueva muestra n de orden $o(n^2)$. Por tanto, la cantidad de memoria requerida va a ser elevada y el tiempo de generación de nuevas muestras va a ser cada vez mayor. Por su parte, el algoritmo RMD genera las muestras desde afuera hacia adentro. Es decir, genera en primer lugar los valores de las muestras en los extremos, y a partir de ellos genera la muestra en el punto medio. Este proceso se va repitiendo sobre los nuevos intervalos creados. Por tanto, tampoco es un algoritmo que se pueda utilizar en tiempo real, y presenta el mismo problema en cuanto a requisitos de memoria que el algoritmo de Hoskings. En este trabajo se ha propuesto un nuevo método para la generación de tráfico autosemejante, que soluciona los problemas presentados por los dos algoritmos anteriores. El método está basado en los procesos integrativos ARIMA(0,d,0), con un valor de d real, entre 0 y 0.5. Está demostrado que, cuando la entrada de un filtro de este estilo es ruido gaussiano, la salida presenta LRD con un valor de H igual a $d+0.5$. El método presentado consiste en la utilización de un filtro FIR equivalente, resultante del desarrollo en serie de Taylor de la función de transferencia del filtro ARIMA(0,d,0). En su modo más exacto, este filtro necesitaría infinitos coeficientes, pero las pruebas llevadas a cabo demuestran que es suficiente con un número finito. Dependiendo de la exactitud deseada en la generación, el número de coeficientes tomados estará entre 5000 y 10000. Las ventajas de este método de generación respecto a los métodos anteriores son las siguientes: En primer lugar, el coste de computación es despreciable y constante para cada nueva generación, en contraposición con el algoritmo de Hoskings que presentaba un orden de computación elevado y creciente geoméricamente para cada nueva generación. Por otra parte, cada

nueva generación es independiente de las anteriores, con lo que la necesidad de memoria es mínima. Además, no hace falta el cálculo de la serie completa antes de su utilización, como ocurre con el algoritmo RMD. Finalmente, el método funciona correctamente en tiempo real, con lo que sus generaciones pueden ser utilizadas para conducir simulaciones.

A continuación, se ha propuesto y analizado un nuevo modelo ARIMA fraccional para el tráfico de vídeo a nivel de cuadro. La parte integrativa fraccional del modelo está basada en el método de diferenciación fraccional previamente presentado y validado. Así, las dependencias a largo plazo quedan correctamente capturadas. A esta parte se han añadido dos nuevos filtros, uno autoregresivo y otro de media móvil, con objeto de capturar las dependencias a corto plazo y las estructuras periódicas producidas por el algoritmo MPEG. La utilización del modelo para la generación artificial de tráfico de vídeo a nivel de cuadro llevó a las siguientes conclusiones. El grado de autosemejanza deseado, normalmente en torno al valor de $H=0.8$, es correctamente alcanzado empleando un número de entre 5000 y 10000 coeficientes en el filtro integrativo. Este resultado se comprobó también mediante la comparación de la función de autocorrelación del tráfico generado con la de las trazas provenientes de la codificación de secuencias reales de vídeo. Por otra parte, la función de densidad de probabilidad del tráfico generado sigue una distribución normal. Como ajuste final, se propone la proyección de esta función de distribución sobre alguna de las que capturan más correctamente el comportamiento del tráfico real, como por ejemplo la distribución lognormal o una combinación de las distribuciones gamma y Pareto.

En la siguiente parte del trabajo se abordó la transmisión del tráfico de vídeo MPEG VBR sobre redes ATM. El primer problema que aparece en este momento, proviene de la propia naturaleza del algoritmo MPEG, que da como resultado una variación periódica de la tasa de salida del codificador. Así, los cuadros I necesitan un número mayor de bits para ser codificados que los cuadros P, los cuales necesitan a su vez un número mayor que los cuadros B. Esto produce que en los instantes de transmisión de los cuadros I se esté enviando a la red un número elevado de bits, mientras que en los instantes de transmisión de los cuadros P y B este número es mucho menor. Esta situación se va repitiendo periódicamente cada GoP. Son numerosos los trabajos de investigación que demuestran que esta forma de transmisión no es adecuada para redes ATM, pudiéndose conseguir una mejor utilización de los recursos mediante el suavizado previo de la información a transmitir. Este problema es bien conocido, y cuenta con soluciones clásicas basadas en el almacenamiento de la información para su posterior transmisión a la tasa media obtenida para un GoP completo. Estos métodos clásicos han sido presentados y analizados mediante simulaciones sobre trazas de tráfico real. El principal inconveniente para su utilización está en el retardo de almacenamiento

que introducen en la transmisión. Dependiendo del tamaño del GoP, con valores típicos entre 6 y 12 cuadros, se podrían estar introduciendo retardos entre los 480 y los 960 ms. Este hecho, hace que estos suavizadores no sean válidos para servicios interactivos, en los cuales el retardo introducido debe ser el mínimo posible. Como solución a este problema, en este trabajo se ha propuesto un nuevo método de suavizado, basado en la predicción del tráfico a nivel de cuadro. La predicción ha sido posible gracias a un modelo ARIMA no fraccional desarrollado previamente para el tráfico a nivel de cuadro. Así, se ha propuesto un conformador predictivo, al que se ha añadido una función de corrección de tasa, con el cual se consigue acotar el retardo introducido a un valor previamente determinado. Marcando este valor máximo del retardo sobre los 80 ó 120 ms se consigue un suavizado de características tan buenas como las de los sistemas clásicos, pero con un retardo muy inferior. La bondad del suavizado obtenido se ha estudiado en función de parámetros de variabilidad de las series, como la relación de rafagueo y el coeficiente cuadrático de variación, y en función de las funciones de autocorrelación. Todas las pruebas han dado como resultado el correcto comportamiento del conformador predictivo, pero con retardos de suavizado muy inferiores.

Por otra parte, se han comprobado las ventajas de la utilización del conformador en la transmisión sobre redes ATM. Para ello, se han llevado a cabo simulaciones de transmisión de fuentes simples, obteniéndose los descriptores de tráfico para distintas probabilidades de pérdida. Como conclusión, se obtiene una importante mejora cuando el tráfico entregado ha sido previamente suavizado con un retardo máximo permitido de 80 ms, equivalente al tiempo necesario para la transmisión de dos cuadros en un sistema a 25 cuadros por segundo. A partir de este valor del retardo máximo permitido, también se obtienen mejoras, pero mucho menos importantes. Las mejoras obtenidas se han cuantificado mediante la definición del parámetro *Ganancia de Suavizado*, G_s , que relaciona la capacidad necesaria para una fuente sin conformar con la capacidad necesaria para la misma fuente conformada, manteniendo constante el retardo máximo introducido por el multiplexor. Como última prueba sobre la transmisión de fuentes simples, se realizaron simulaciones con objeto de obtener la probabilidad de pérdida de las fuentes conformadas y sin conformar, en función de la capacidad de canal asignada, y para varios valores del tamaño del buffer del multiplexor. Dichas simulaciones evidenciaron de nuevo las ventajas de la conformación.

Como último trabajo dentro de este apartado de la Tesis, se estudiaron algunos casos concretos de multiplexación de fuentes conformadas y sin conformar. El objetivo era poner de evidencia otro de los problemas que pueden surgir si la transmisión del tráfico se hace sin suavizar. Este problema consiste en la posibilidad de la alineación de los GoPs de las secuencias que se estén transmitiendo, coincidiendo los instantes de transmisión de los cuadros I, P y B de cada una de ellas. De esta forma, la diferencia

entre la cantidad de información que se desea transmitir en unos instantes o en otros sería aún mayor. En particular, se estudiaron los parámetros de variabilidad para casos concretos de multiplexación, en los cuales dos fuentes se transmitían de varias formas. En primer lugar se alineaban exactamente los GoPs de ambas fuentes, y después se simulaba la transmisión con varios valores de desfase entre ellas. Los resultados obtenidos, para todos los casos, indican de nuevo la conveniencia de la conformación previa del tráfico.

Finalmente, una vez solucionados los problemas de variabilidad introducidos por el algoritmo de codificación, se pasó a trabajar sobre el problema de la variabilidad introducida por la diferente complejidad de las distintas secuencias a codificar dentro de una misma secuencia de vídeo. Debido a esta distinta complejidad, las secuencias generadas por el codificador MPEG pasan por distintos niveles de actividad, siendo muy variable la cantidad de información entregada. Cuando se establece una conexión clásica ATM, sobre servicios CBR o VBR, se asignan una serie de recursos para toda la conexión. Con objeto de proporcionar una calidad de servicio determinada, esta asignación de recursos corresponderá a la necesaria durante los instantes de mayor actividad de la fuente. Sin embargo, estos instantes representarán un porcentaje pequeño del tiempo total de la conexión, con lo que durante gran parte de ella se estarán desaprovechando los recursos asignados. Para solventar este problema, recientemente han sido propuestos los servicios con asignación dinámica de recursos. Así, cuando la fuente necesita más recursos, los solicitará a la red, liberándolos en los instantes de menor actividad, de forma que puedan ser aprovechados por otras conexiones.

En este trabajo se ha propuesto un nuevo mecanismo para la implementación de la asignación dinámica de recursos. Básicamente, un mecanismo de este estilo debe responder a las cuestiones de cuándo solicitar renegociación, cómo solicitarla y cuántos recursos se deben solicitar o liberar. El mecanismo propuesto se basa en la caracterización previa del tráfico de vídeo MPEG VBR a nivel de GoP mediante un modelo de fluidos bidimensional. El modelo captura correctamente las dependencias a corto y largo plazo del tráfico caracterizado. Mediante este modelo, es posible la identificación de tres niveles distintos de actividad de las fuentes de vídeo, y de los umbrales que los separan. De este modo, se ha propuesto un nuevo elemento supervisor y controlador, encargado por una parte de llevar a cabo la gestión de las solicitudes y liberaciones de recursos con la red, y por otra de regular la tasa de salida del codificador en los instantes en que las renegociaciones de recursos sean bloqueadas. Además, las funciones de policía local necesarias para no incumplir el contrato establecido con la red también son incluidas en este dispositivo. Esta función se puede realizar por ejemplo utilizando la escalabilidad en SNR proporcionada por el algoritmo MPEG-2, mediante la marcación de prioridad baja en el flujo de mejora.

Los momentos en los cuales se decide solicitar o liberar recursos coinciden con aquellos en que la fuente cruza entre distintos niveles de actividad. Por otro lado, la forma de solicitar las renegociaciones está basada en la utilización del campo ER de las celdas OAM. Finalmente, la cantidad de recursos a solicitar o liberar será la diferencia de recursos asignados para los distintos niveles de actividad. Además, se deberá tener en cuenta el número de fuentes multiplexadas, cuando la renegociación que se esté realizando sea de servicios VBR.

Para la labor de regulación de la tasa del codificador se ha empleado una relación de incrementos entre la tasa de salida y el valor del parámetro de cuantificación Q . El correcto funcionamiento del sistema propuesto se ha llevado a cabo mediante simulación con una secuencia de pruebas que incluye saltos bruscos de actividad entre los diferentes niveles. Para ello, se simularon las situaciones extremas en las cuales o bien la red no permitía ninguna renegociación, o bien las permitía todas introduciendo un retardo de reconocimiento en la asignación de los nuevos recursos.

El trabajo realizado en esta Tesis se ha completado con la propuesta final de un interfaz para fuentes de vídeo MPEG VBR sobre redes ATM. El interfaz es el resultado de la combinación del elemento supervisor controlador con el conformador de tasa presentado anteriormente. Se ha estudiado el comportamiento del interfaz con tres de los conformadores de tasa estudiados, a saber, el conformador ideal, el deslizante y el predictivo. Los dos primeros implicarían la introducción de algún control adicional para un correcto funcionamiento del interfaz, ya que aparecen oscilaciones en la tasa de salida cuando se producen transiciones de nivel que no son aceptadas por la red. Además, en las transiciones de subida aparece siempre un largo periodo durante el cual el sistema aún no se ha adaptado, pretendiendo así transmitir a más tasa de la permitida por la red. Las pérdidas sufridas durante estos instantes no pueden ser subsanadas por ninguna técnica de control adicional. Sin embargo, cuando el conformador utilizado es el predictivo, la rápida adaptación en las transiciones de subida permiten alcanzar rápidamente un régimen estable, tanto si la solicitud de renegociación es admitida por la red como si no lo es. Además, el intervalo de tiempo en que se intenta transmitir a una tasa superior a la permitida es reducido considerablemente. El correcto funcionamiento del interfaz así diseñado, ha sido comprobado tanto sobre la secuencia de pruebas como sobre la transmisión de trazas de tráfico real.

A continuación, se han cuantificado las ganancias obtenidas mediante la utilización del interfaz propuesto. Se han considerado las posibilidades de renegociación de servicios a tasa constante y a tasa variable, obteniéndose los mejores resultados sobre esta última modalidad. En particular, con el sistema descrito, se consigue ampliar el margen en el cual los beneficios de la multiplexación estadística se ponen de manifiesto. Para sistemas VBR sin renegociación, la ganancia de multiplexación estadística será

importante cuando el número de fuentes multiplexadas sea elevado. Utilizando el sistema de renegociaciones, esta restricción no será necesaria, obteniéndose una ganancia equivalente a la de multiplexación estadística incluso con un número pequeño de fuentes multiplexadas.

Las prestaciones del sistema presentado han sido también evaluadas mediante simulación sobre trazas de tráfico real. Se han simulado transmisiones de películas completas, con diferentes modalidades de servicio por parte de la red. Entre ellas, se ha trabajado sobre las posibilidades de que la red no permita renegociaciones de recursos, de que las permita siempre y sin demora, y de que las permita siempre pero con una demora aleatoria entre unos márgenes determinados. En todos los casos se ha comprobado el correcto funcionamiento del interfaz. Además, se ha cuantificado la ganancia obtenida, en términos de eficiencia de ancho de banda. Los resultados han puesto de manifiesto, de nuevo, la conveniencia de la asignación dinámica de recursos. Por otra parte, se ha cuantificado la calidad subjetiva del sistema en términos de PSNR. Utilizando secuencias codificadas con un parámetro de cuantificación igual a 6, se obtiene una PSNR en la mayor parte de la secuencia alrededor de 38 dB, no bajando en ningún caso de los 35 dB.

2 Líneas futuras

A continuación se proponen una serie de líneas de investigación que quedan abiertas tras la conclusión de este trabajo.

En primer lugar, y en lo que respecta al modelado del tráfico, es interesante recordar que gran parte de los tipos de tráfico que van a circular por la B-ISDN presentan carácter autosemejante. Como se ha comentado, esta propiedad aparece en tráficos tan dispares como el tráfico de vídeo o el tráfico proveniente de servidores web. En este sentido, se propone la búsqueda de un modelo para el tráfico agregado proveniente de fuentes heterogéneas, utilizando el método de diferenciación fraccional propuesto en este trabajo para capturar las dependencias a largo plazo. La utilidad de este modelo se haría evidente en el dimensionado de colas de espera y capacidad de canales para los nodos intermedios de la B-ISDN.

Por otra parte, sería de gran interés la búsqueda de una relación entre la persistencia de las fuentes simples y la persistencia del tráfico agregado, analizando su impacto en la ganancia de multiplexación estadística, lo cual sería de nuevo de aplicación directa en el dimensionado de multiplexores y conmutadores.

En cuanto al mecanismo de asignación dinámica presentado, al estar basado en un modelo ajustado independientemente para secuencias con parámetro de cuantificación Q distinto, sería interesante la búsqueda de un modelo de fluidos bidimensional que contemple la dependencias de sus parámetros con dicho paso de cuantificación.

También sería deseable el diseño de algún sistema de control que fuese capaz de ajustar el valor de los niveles de transición, en función de las secuencias concretas que se estén transmitiendo, y del estado de la red. Esta función sería realizable en el propio elemento supervisor controlador.

Otra línea inmediata a seguir tras la conclusión de este trabajo es la aplicación a codificadores reales MPEG-2 con escalabilidad en SNR. En este sentido, se deberán realizar simulaciones de acceso mediante el interfaz desarrollado sobre una red ATM empleando codificadores MPEG-2 en tiempo real. De esta forma se trabajaría sobre el mecanismo de admisión, la probabilidad de bloqueo de las renegociaciones y la calidad entregada al servicio.

El desarrollo paralelo de la red Internet, y el nuevo protocolo IP versión 6, que intenta garantizar calidades de servicio, hacen que los sistemas de transmisión de vídeo sobre esta red sean un campo muy interesante de investigación. En este sentido, se podrían evaluar los mecanismos de suavizado y asignación dinámica de recursos presentados en este trabajo.

Apéndice

Ubicación de recursos en redes ATM mediante dinámica de fluidos

En este apéndice se presenta una técnica para llevar a cabo la ubicación de recursos en redes ATM. Dicha técnica se basa en la consideración de que la información a transmitir por unidad de tiempo va a ser suficientemente grande, de forma que se puede considerar como un flujo continuo. Es decir, no se tendrá en cuenta el efecto discretizador de la división en paquetes de dicha información.

Para llevar a cabo este estudio, presentado fundamentalmente en [AniMit82] y [Sch96], se procederá en primer lugar a la caracterización del tráfico como superposición de fuentes simples ON/OFF. De esta forma se podrá, a continuación, estudiar la multiplexación estadística de este tipo de fuentes. Dicha multiplexación se analizará en primer lugar en ausencia de buffers de espera, permitiendo sólo la existencia de buffers de contención. Posteriormente, se añadirán los buffers de espera.

1 MODELO ON/OFF PARA LAS FUENTES DE TRÁFICO

La aplicación de nuevas técnicas de compresión y explotación del ancho de banda para distintos tipos de servicios ha provocado la necesidad de caracterizar estas fuentes de tráfico para la evaluación y dimensionado de las redes que las soportan. Como se expondrá a continuación, todas estas fuentes de tráfico son caracterizables mediante modelos ON/OFF. A través de esta caracterización se pueden evaluar las prestaciones de la multiplexación estadística de grupos de fuentes, tanto homogéneas como heterogéneas, que comparten los mismos recursos, es decir, buffers y enlaces.

1.1 Modelo para las fuentes de voz

La reducción del ancho de banda necesario en los servicios de voz se obtiene a través de técnicas de detección de actividad y técnicas de compresión. Si observamos la evolución de una conversación, se manifiesta que los locutores alternan entre periodos de actividad y periodos de inactividad. En general, estos últimos son de mayor duración que los de actividad, como se esboza en la figura A.1.

La detección de la presencia de ráfagas de voz (*talk spurt*) permite emplear la técnica TASI (*time-assigned speech interpolation*), de forma que el receptor sólo recibirá tráfico del emisor cuando el primero se encuentre en estado activo, y considerará que las muestras son de valor nulo durante los periodos de inactividad.

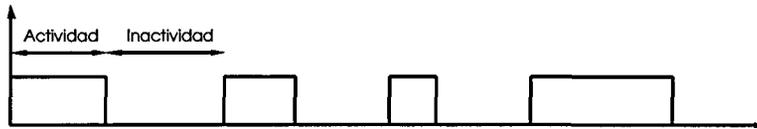


Figura A.1. Periodos de actividad e inactividad

Por otra parte, durante los periodos de actividad se pueden emplear diferentes mecanismos de compresión. De esta forma se puede reducir el ancho de banda necesario, bajando desde los típicos 64 Kbps hasta un rango comprendido entre los 4 y los 13 Kbps, dependiendo de la calidad deseada y, por tanto, del mecanismo de compresión utilizado.

Suponiendo que la duración de las ráfagas de habla se puede considerar exponencial, y la duración de los periodos de silencio también, una fuente de voz es caracterizable como una cadena de Markov de dos estados, representada en la figura A.2. En uno de ellos, OFF, la tasa de generación es nula, mientras que en el otro, ON, se tendrá una tasa constante distinta de cero.

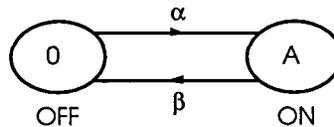


Figura A.2. Modelo ON/OFF para las fuentes de voz

El análisis de esta cadena es inmediato para la obtención de las probabilidades de los estados y de los tiempos medios de permanencia en cada uno de ellos:

$$\begin{aligned} p_{ON} &= \frac{\alpha}{\alpha + \beta} & \bar{t}_{ON} &= 1/\beta \\ p_{OFF} &= \frac{\beta}{\alpha + \beta} & \bar{t}_{OFF} &= 1/\alpha \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

de donde se obtiene la tasa media de generación para la fuente de voz como:

$$\lambda = p_{ON}A = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}A \quad (\text{A.2})$$

1.2 Modelo para las fuentes de datos

En general, el comportamiento del tráfico de datos también es modelable de forma aproximada con un modelo ON/OFF. El tráfico generado por una estación terminal de datos normalmente es un tráfico a ráfagas, con lo que se tienen, al igual que en el caso de las fuentes de voz, periodos de actividad e inactividad. Tomando constante la tasa de generación durante los períodos de actividad, y suponiendo que la duración, tanto de dichos periodos de actividad como de los de inactividad, sigue una distribución exponencial, es posible considerar un modelo igual de simple que el anterior para caracterizar el tráfico de datos.

1.3 Modelo para las fuentes de vídeo

La información de vídeo, al igual que la de voz, también es sometida a técnicas de compresión antes de ser transmitida para reducir el ancho de banda consumido. Las técnicas de compresión aprovechan tanto la redundancia espacial como la temporal. La primera trata con el parecido entre los pixels de la misma zona de la imagen, y la segunda con el parecido de los pixels de imágenes consecutivas en una misma secuencia de vídeo. Debido a la variación en la complejidad de las secuencias de vídeo (imágenes estáticas o en movimiento, cambios de escena, ...), la tasa generada por el compresor deberá ir variando para producir una transmisión de calidad constante. Por ejemplo, una realización podría presentar el comportamiento de la figura A.3.

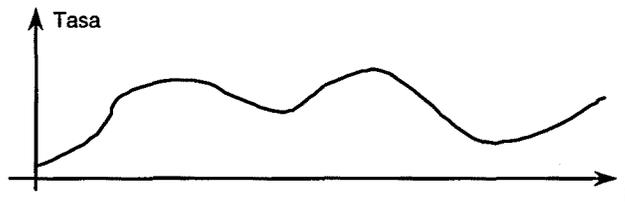


Figura A.3. Variación de la tasa de salida de un compresor de vídeo

Como aproximación, consideraremos que la tasa sólo puede ir tomando valores discretos, como se muestra en la figura A.4. Esta aproximación del comportamiento será tanto más válida cuanto mayor sea el número de niveles de cuantificación.

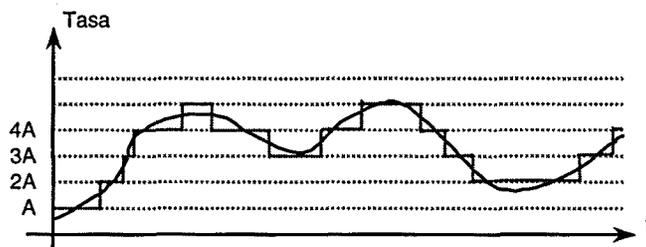


Figura A.4. Discretización de la tasa de salida de un compresor de vídeo

Considerando además que en las secuencias no habrá cambios bruscos de tasa, se puede asumir que los cambios de estado se van a dar siempre entre estados adyacentes. Si, finalmente, adoptamos el criterio de distribución exponencial para el tiempo de permanencia en cada estado, podremos modelar la fuente de vídeo con la cadena de Markov de la figura A.5. El modelo resultante da lugar a un proceso de fluidos modulado por Markov (*Markov Modulated Fluid Process, MMFP*).

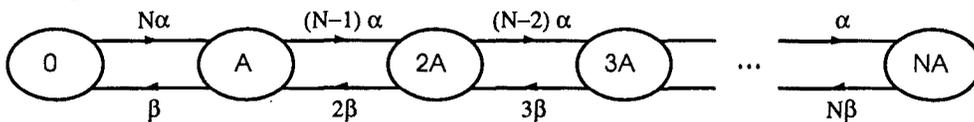


Figura A.5. Modelo para una fuente de vídeo

Por otra parte, este modelo se puede descomponer en un conjunto de N fuentes ON/OFF como las tomadas para las fuentes de voz, como se muestra en la figura A.6.

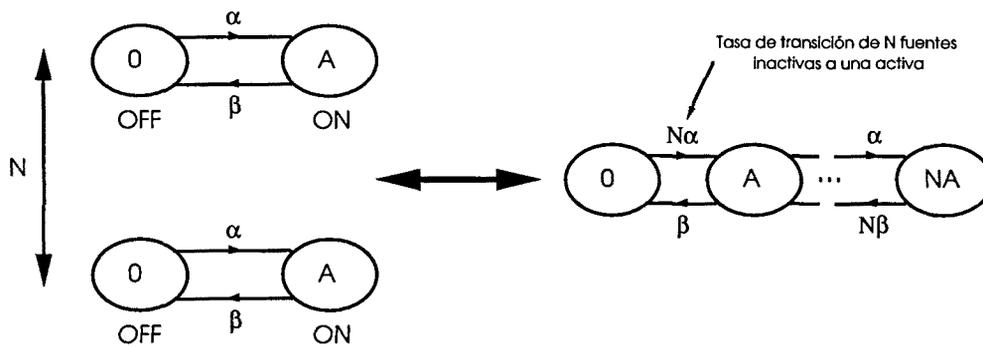


Figura A.6. Descomposición del modelo en N fuentes simples

Del análisis en régimen permanente de la cadena de Markov anterior, se obtiene que la probabilidad de estar en un estado concreto k es:

$$P_k = \binom{N}{k} p_{ON}^k (1 - p_{ON})^{N-k} \quad (\text{A.3})$$

con lo que la tasa media de generación vendrá dada por:

$$\lambda = N A p_{ON} = N A \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (\text{A.4})$$

2. MULTIPLEXACIÓN ESTADÍSTICA Y APROXIMACIÓN DE FLUIDOS

Por recursos de red asignados a un tráfico determinado en un nodo entendemos el ancho de banda y el tamaño de buffer necesarios para ofrecer la calidad de servicio deseada. A su vez, por calidad de servicio consideramos la probabilidad de pérdida y el retardo máximo experimentado en el buffer.

Con el fin de maximizar la explotación de los recursos de la red, se introduce la multiplexación estadística de los distintos tipos de tráfico, así como su integración en una única red. Dicha técnica permite compartir a varias conexiones un número determinado de ranuras temporales o *slots*, con la consiguiente probabilidad de pérdida de paquetes. Siempre que esta probabilidad sea reducida, la pérdida de paquetes en servicios de vídeo y audio se podrá solucionar con mayor o menor éxito mediante técnicas de interpolación. Para los servicios de datos se hará generalmente más adecuada una técnica de retransmisión.

La idea, por tanto, se centra en multiplexar un número N de fuentes sobre un mismo canal, y encontrar el máximo valor de N que nos permita mantener la probabilidad de pérdida por debajo de una cota determinada satisfaciendo a su vez la restricción de un retardo máximo. Dos consideraciones se pueden plantear en la asignación de recursos en función de la dimensión del buffer analizado. En el caso de que el tamaño sea reducido, las colas de almacenamiento sólo se emplearán para la contención, o conflictos de acceso, en los multiplexores y conmutadores. Si el diseño de los buffers contempla también la absorción de las generaciones en avalancha, su tamaño debe incrementarse para producir el efecto de suavizado deseado. En este último caso, obviamente, se

incrementa la ganancia de multiplexación. El desarrollo de estas consideraciones se ha podido plantear de forma analítica, estableciendo cotas del comportamiento del tráfico real.

2.1 Multiplexación estadística con buffers de contención

A partir de los modelos de tráfico MMFP, presentados en el apartado anterior, la tasa media de generación de una fuente simple ON/OFF será:

$$\lambda = Ap_{ON} = A \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \tag{A.5}$$

Para el caso de un grupo de N fuentes homogéneas, incluyendo voz, datos y vídeo:

$$\lambda = NAp_{ON} = NA \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \tag{A.6}$$

En este caso, para tener una probabilidad de pérdida nula, necesitaríamos un canal de capacidad igual a:

$$NA \text{ slots / seg.} \tag{A.7}$$

En general, supondremos que el enlace soporta:

$$CA \text{ slots / seg.} \tag{A.8}$$

Por tanto, la condición de estabilidad será:

$$\frac{\alpha}{\alpha + \beta} NA < CA \tag{A.9}$$

o lo que es lo mismo, en términos del factor de utilización:

$$\rho = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \frac{N}{C} < 1 \tag{A.10}$$

A partir de la cadena de Markov que modela la agregación de N fuentes simples, podemos definir una zona en la que hay pérdidas o zona de sobrecarga, y otra en la que no las hay o zona de subcarga, como se muestra en la figura A.7.

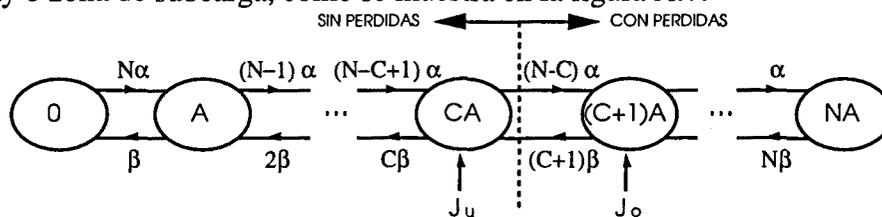


Figura A.7. Zonas de subcarga y de sobrecarga

En el caso de que el elemento que lleva a cabo la multiplexación no disponga de buffer de almacenamiento, cualquier estado por encima del J_o provocará pérdidas. En caso contrario, cuando se dispone de buffer, este se llenará a una velocidad igual a:

$$A(J - C) \tag{A.11}$$

Fijémonos en primer lugar en el caso en el que no se dispone de buffer. El número medio de fuentes simples activas será:

$$m = p_{ON} N = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = pN \quad (\text{A.12})$$

Con lo cual es obvio que necesitaremos un valor de C mayor que m .

De forma intuitiva se puede dar una expresión muy aproximada para la probabilidad de pérdida basada en la probabilidad de visita a los estados en régimen permanente. Esta expresión se basa en considerar la probabilidad de pérdida como el cociente entre el valor medio de paquetes perdidos en los estados y el valor medio generado en un estado, con lo que se obtiene:

$$P_{ss} = p_{J_0} \frac{J_0 - C}{m} + \dots + p_N \frac{N - C}{m} = \sum_{k=J_0}^N p_k \frac{k - C}{m} \quad (\text{A.13})$$

La aproximación radica en que no se consideran ni el régimen transitorio ni los instantes de transición entre los estados.

2.2 Multiplexación estadística con buffer de almacenamiento

En la figura A.8 se muestra el esquema estudiado para la multiplexación de N fuentes ON/OFF sobre un sistema modelado a través de un buffer de almacenamiento y un canal de transmisión, donde el factor de utilización será:

$$\rho = p \frac{N}{C} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \frac{N}{C} \quad (\text{A.14})$$

valor que deberá ser menor que la unidad por motivos de estabilidad.

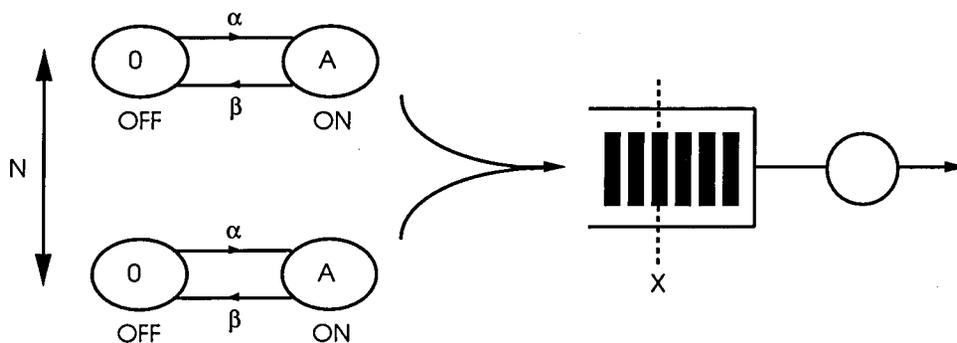


Figura A.8. Multiplexación con capacidad de almacenamiento.

Podemos definir ahora una variable aleatoria X que nos proporcione el nivel de ocupación del buffer. Para su estudio, tomaremos $F_i(x, t)$ como la función de distribución de probabilidad en el instante t de que la ocupación del buffer sea menor o igual que x cuando hay i fuentes activas:

$$F_i(x, t) = P[X(t) \leq x, i \text{ fuentes activas}] \quad (\text{A.15})$$

Para encontrar dicha función, nos fijaremos en su evolución durante un intervalo Δt . Tomando una capacidad de canal CA , el ritmo de llenado del buffer cuando hay i fuentes activas será $(i-C)A$. Para evaluar $F_i(x, t + \Delta t)$ debemos considerar en qué estados

podría encontrarse el sistema en el instante t , para lo cual supondremos que las transiciones sólo se podrán haber producido entre estados vecinos ($\Delta t \ll 0$). Por tanto:

$$\begin{aligned} F_i(x, t + \Delta t) &= (N - i + 1)\alpha\Delta t F_{i-1}(x, t) + (i + 1)\beta\Delta t F_{i+1}(x, t) + \\ &\quad + \{1 - [(N - i)\alpha - i\beta]\Delta t\}F_i(x + \Delta x, t) \\ \Delta x &= -(i - C)A\Delta t \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Para los estados limítrofes las ecuaciones se simplifican dado que:

$$F_{-1}(x, t) = F_{N+1}(x, t) = 0 \quad (\text{A.17})$$

Dividiendo por Δt , y tomando el límite cuando Δt tiende a cero, tendremos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial t} &= (N - i + 1)\alpha F_{i-1}(x, t) + (i + 1)\beta F_{i+1}(x, t) - \\ &\quad - [(N - i)\alpha - i\beta]F_i(x + \Delta x, t) + \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \\ \Delta x &= -(i - C)A\Delta t \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

donde:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial t} &= (N - i + 1)\alpha F_{i-1}(x, t) + (i + 1)\beta F_{i+1}(x, t) - \\ &\quad - [(N - i)\alpha + i\beta]F_i(x, t) - (i - C) \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial x} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

En régimen permanente podemos considerar que no hay dependencias temporales, con lo cual el análisis se simplifica a:

$$\frac{\partial F_i(x, t)}{\partial t} = 0 \Rightarrow F_i(x) = F_i(x, t)|_{t \rightarrow \infty} \quad (\text{A.20})$$

Introduciendo esta última variación en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} (i - C)A \frac{\partial F_i(x)}{\partial x} &= (N - i + 1)\alpha F_{i-1}(x) + (i + 1)\beta F_{i+1}(x) - \\ &\quad - [(N - i)\alpha + i\beta]F_i(x) \\ F_{-1}(x) &= F_{N+1}(x) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Podemos escribir el conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (-AC) \frac{\partial F_0(x)}{\partial x} &= -N\alpha F_0(x) + \beta F_1(x) \\ (A - AC) \frac{\partial F_1(x)}{\partial x} &= N\alpha F_0(x) - [(N - 1)\alpha + \beta]F_1(x) + 2\beta F_2(x) \\ (2A - AC) \frac{\partial F_2(x)}{\partial x} &= (N - 1)\alpha F_1(x) - [(N - 2)\alpha + 2\beta]F_2(x) + 3\beta F_3(x) \\ &\quad \vdots \\ (NA - AC) \frac{\partial F_N(x)}{\partial x} &= \alpha F_{N-1}(x) - N\beta F_N(x) \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

o bien expresarlo matricialmente:

$$D \frac{dF(x)}{dx} = QF(x) \quad (\text{A.23})$$

con:

$$F(x) = (F_0(x), F_1(x), \dots, F_N(x))^T$$

$$D = A \begin{pmatrix} -C & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-C & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2-C & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N-C \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} -N\alpha & \beta & 0 & \dots & 0 \\ N\alpha & -[(N-1)\alpha + \beta] & 2\beta & \dots & 0 \\ 0 & (N-1)\alpha & & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & N\beta \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & -N\beta \end{pmatrix} \quad (\text{A.24})$$

Obsérvese que la suma de las columnas de la matriz Q , generador infinitesimal de la cadena de Markov del modelo MMFP, es en todos los casos 1.

Si ahora definimos:

$$M = D^{-1}Q \quad (\text{A.25})$$

llegamos a:

$$\frac{dF(x)}{dx} = MF(x) \quad (\text{A.26})$$

lo cual no es más que la expresión matricial de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, cuya solución es de la forma:

$$F(x) = \sum_{k=0}^N c_k e^{z_k x} w_k \quad (\text{A.27})$$

donde c_k son constantes por determinar según las condiciones de contorno, z_k son los autovalores de la matriz M y w_k son los autovectores asociados.

Para el cálculo de los autovalores y de los autovectores, se pueden aplicar generalmente las técnicas clásicas. Recordemos que un autovalor y su autovector asociado deben cumplir:

$$Mw_k = z_k w_k \quad (\text{A.28})$$

lo cual se puede escribir también como:

$$(M - z_k I)w_k = 0 \quad (\text{A.29})$$

Además, los valores propios son los valores de z que cumplen:

$$\det(M - zI) = 0 \quad (\text{A.30})$$

es decir, son las raíces del polinomio característico $q(z)$ tal que:

$$q(z) = \det(M - zI) \quad (\text{A.31})$$

Cuando se dispone de los autovalores, los autovectores se pueden calcular mediante el sistema de ecuaciones compatible indeterminado:

$$(M - z_k I)w_k = 0 \quad (\text{A.32})$$

Es interesante particularizar la N-ésima componente a 1 por comodidad en las operaciones posteriores.

Obviamente, la componente i-ésima del vector $F(x)$ se puede expresar de la siguiente forma a través de las componentes i-ésimas de los autovectores:

$$F_i(x) = \sum_{k=0}^N c_k e^{z_k x} w_{k_i} \tag{A.33}$$

Además, se puede demostrar que [Gar92]:

- Todos los valores propios son reales.
- Hay $N-J_u$ autovalores negativos, J_u positivos y el 0.
- El mayor valor propio negativo vale:

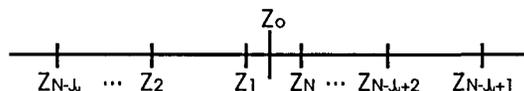
$$z_1 = \frac{\alpha + \beta - \alpha N/C}{(1 - C/N)A} = -(\alpha + \beta) \frac{(1 - \rho)}{(1 - C/N)A} \tag{A.34}$$

- El vector propio del autovalor 0 es:

$$\Pi = (p_0 p_1 \dots p_N)^T \tag{A.35}$$

es decir, las probabilidades en régimen permanente de encontrarse en un estado.

Por comodidad, nombraremos los autovalores de la siguiente manera:



Recordando la expresión de $F(x)$:

$$F(x) = \sum_{k=0}^N c_k e^{z_k x} w_k \tag{A.36}$$

se puede observar que los autovalores positivos no tienen sentido ya que aumentarían la probabilidad de ocupación para valores de X mayores. Estrictamente, para colas de longitud infinita:

$$F_i(x) \leq 1 \quad \forall x \Rightarrow C_{N-J_u+1} = \dots = C_N = 0 \tag{A.37}$$

Con estas apreciaciones llegamos a:

$$F(x) = \Pi + \sum_{k=1}^{N-J_u} c_k e^{z_k x} w_k \tag{A.38}$$

De entre el conjunto de exponenciales, la de mayor influencia será aquella que decaiga de forma más lenta. Así, para longitudes grandes del buffer, el autovalor dominante será el negativo que esté más próximo a cero, con lo que para valores altos de x es válida la aproximación:

$$F(x) \cong \Pi + c_1 e^{z_1 x} w_1 \tag{A.39}$$

Finalmente, se debe hallar la probabilidad de no rebasar un nivel de ocupación en el buffer, es decir:

$$P(X \leq x) = \sum_{i=0}^N F_i(x) \tag{A.40}$$

valor independiente del número de fuentes activas.

En general, se operará con la función complementaria, es decir, con la probabilidad de superar un nivel de ocupación determinado. A esta función la denominaremos *función de supervivencia*, y vendrá dada por:

$$G(x) = P(X > x) = 1 - \sum_{i=0}^N F_i(x) \quad (\text{A.41})$$

De forma aproximada, considerando sólo el autovalor dominante:

$$G(x) \cong 1 - \sum_{i=0}^N (p_i + c_1 e^{z_i x} w_{1i}) \quad (\text{A.42})$$

Dado que:

$$\sum_{i=0}^N p_i = 1 \quad (\text{A.43})$$

obtenemos:

$$G(x) \cong -c_1 \left(\sum_{i=1}^N w_{1i} \right) e^{z_1 x} \quad (\text{A.44})$$

Se puede demostrar que [AniMit82]:

$$G(x) \cong A_N \rho^N e^{z_1 x} \quad (\text{A.45})$$

donde A_N depende del número de fuentes ON/OFF. En general, para un número de polos negativos superior a 1 tendremos:

$$A_N = \prod_{i=2}^{N-J_u} \frac{z_i}{z_i - z_1} \quad (\text{A.46})$$

Para el caso particular de un sólo polo negativo, $A_N=1$.

Si se desear emplear todos los autovalores negativos, el cálculo de los coeficientes de la expresión:

$$G(x) = \sum_{i=1}^{N-J_o} \left(c_i e^{z_i x} \sum_{j=1}^N w_{ij} \right) \quad (\text{A.47})$$

se debe realizar imponiendo como condición de contorno que la probabilidad de ocupación del buffer para un tamaño 0 es nula para estados de sobrecarga, es decir:

$$F_j(0) = p_j + \sum_{i=1}^{N-J_o} (c_i e^{z_i x} w_{ij}) = 0 \quad j \geq J_o \quad (\text{A.48})$$

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, se puede realizar una aproximación muy precisa que compatibiliza el valor de la probabilidad de pérdida para una multiplexación con o sin buffer de almacenamiento. De forma que:

$$G(x) \cong P_{SS} e^{z_1 x} \quad (\text{A.49})$$

Teniendo en cuenta que el buffer de almacenamiento será de dimensión finita. se obtiene que el tamaño del buffer debe cumplir:

$$G(x) = P_L \Rightarrow x = \frac{1}{z_1} \ln \left(\frac{P_L}{P_{SS}} \right) \quad (\text{A.50})$$

Para fijar un retardo máximo y una probabilidad de pérdida determinada, el método de cálculo de la capacidad y longitud del buffer es recursivo, ya que el retardo vendrá dado por:

$$d_{max} = \frac{x}{CA} \tag{A.51}$$

de donde, empleando la relación:

$$x = -\frac{A \ln\left(\frac{P_L}{P_{SS}}\right)}{1-\rho} \left(1 - \frac{C}{N}\right) \frac{1}{\alpha + \beta} \tag{A.52}$$

se obtiene:

$$d_{max} = -\frac{\ln\left(\frac{P_L}{P_{SS}}\right)}{1-\rho} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{N}\right) \frac{1}{\alpha + \beta} \tag{A.53}$$

Por tanto, el valor de C que satisfaga la expresión (A.53) será el valor mínimo de la capacidad para ofrecer el grado de servicio demandado en la multiplexación de las N minifuentes. Esta capacidad se suele denotar C_N . A su vez, la longitud del buffer asociada, L_{max} , deberá respetar la relación (A.51).

Como primera aproximación a la multiplexación de fuentes heterogéneas con el mismo grado de servicio se considera una cota superior a partir de la asignación disjunta de capacidades. Así, la capacidad asignada para el conjunto heterogéneo de N minifuentes con grupos de N_j minifuentes idénticas sería:

$$C_N = \sum_j C_{N_j} \text{ con } N = \sum_j N_j \tag{A.54}$$

Otra aproximación muy precisa se ha analizado y comprobado en [Pal97] y [FerCal98] para dos tipos de fuentes distintas, dando lugar a la siguiente expresión para la probabilidad de pérdida:

$$P_L(x) = \frac{P_{SS}}{P_{SS1} + P_{SS2}} \left(P_{SS1} e^{z_{11}x} + P_{SS2} e^{z_{21}x} \right) \tag{A.55}$$

donde P_{SS} es la probabilidad conjunta de pérdida en ausencia de buffer, P_{SS1} y P_{SS2} corresponden a cada uno de los dos tipos de fuentes por separado, y z_{11} y z_{21} son los autovalores dominantes.

2.3 Evaluación de la multiplexación estadística

Se puede determinar la ganancia de multiplexado estadístico a través de la cuantificación de la reducción de recursos obtenida cuando un grupo de minifuentes se multiplexa estadísticamente. Una posible definición de ganancia de multiplexado es comparar el ancho de banda por fuente necesario cuando se transmite una fuente y cuando se multiplexan N fuentes manteniendo el mismo grado de servicio de la red en cuanto a probabilidad de pérdida y retardo máximo [MatPag96]. De este modo, podemos expresar la ganancia de multiplexación estadística:

$$G_N = \frac{NC_1}{C_N} \quad (\text{A.56})$$

donde C_k , con $k \in \{1, 2, \dots, N\}$, es el ancho de banda asignado a k fuentes cuando se multiplexan estadísticamente con las mismas restricciones de retardo y probabilidad de pérdida.

Se comprueba que la ganancia de multiplexación viene influenciada por el tamaño del buffer L_{max} , y el número de fuentes, N . Esto se traduce en que servicios con la misma naturaleza de tráfico alcanzan mayor ganancia de multiplexación estadística cuanto menos restrictivo sea el retardo máximo de tránsito por la red, o de forma equivalente, necesitan una menor asignación de ancho de banda para la misma probabilidad de pérdida. En el límite, aumentando el buffer, el ancho de banda necesario tiende a la media a largo plazo de la fuente. Aplicando la ley de los grandes números se puede concluir igualmente que el límite inferior de la asignación de ancho de banda para el tráfico multiplexado es la tasa media total, es decir, la asignación de ancho de banda para una fuente está más próxima a su media cuanto mayor es el número de fuentes combinadas. No obstante, la tasa de pico establece la menor cantidad que daría lugar a una ubicación de recursos con probabilidad de pérdida nula. Claramente, cualquier asignación por encima de la tasa de pico es innecesaria y derrochadora. Por lo tanto, los anchos de banda de pico, r_p , y medio, r_m , de las fuentes acotan el ancho de banda necesario en la red.

$$1 \leq G_N \leq \frac{r_p}{r_m} \quad (\text{A.57})$$

Esta definición presenta las propiedades de ser aplicable tanto para la asignación de capacidades como para la dimensión del buffer. Así:

$$G_N = \frac{NC_1}{C_N} = \frac{Nx_1}{x_N} \Big|_{d_{max} = x_i/c_i} \quad (\text{A.58})$$

donde x_i es la dimensión del buffer compartido por i minifuentes.

Referencias

- [Ada96] A. Adas, "Supporting Real Time VBR Video Using Dynamic Reservation Based on Linear Prediction", Proceedings del IEEE INFOCOM'96, pp. 1476-1483, 1996.
- [AdaMuk95] A. Adas and A. Mukherjee, "On Resource Management and QoS Guarantees For Long Range Dependent Traffic", Proceedings of IEEE INFOCOM'95, pp. 779-787, 1995.
- [And93] J. Andrade, "Statistical parameter to describe all traffic generated by broadband services", Comunicaciones de Telefónica I+D, vol.4, no.2, pp. 81-88, Julio-Diciembre 1993.
- [AniMit82] Anick, Mitra and Shondy, "Stochastic Theory of a Data-Handling System with Multiple Sources", The Bell System Technical Journal, vol. 61, no. 8, pp. 1871-1894, October 1982.
- [ATMFor1] Audio/Visual Multimedia Services: Video on Demand v1.1, marzo 1997.
- [ATMFor2] UNI Signaling 4.0, julio 1996.
- [BerShe95] J. Beran, R. Sherman, M. S. Taqqu y W. Willinger, "Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic" IEEE Trans. Commun., vol. 43, pp. 1566-1579, 1995.
- [BoxJen76] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, "Time Series Analysis: Forecasting and Control". Revised Edition, Holden-Day, San Francisco, 1976.
- [CasCav91] P. Castelli, E. Cavallero and A. Tonietti, "Policing and Call Admission Problems in ATM Networks", ITC-13, pp. 847-852, 1991.
- [CasLor97] E. Casilari, M. Lorente, A. Reyes, A. Díaz y F. Sandoval, "Modelado de Vídeo VBR Orientado a Escena", Jornadas de Ingeniería Telemática JITEL'97, pp. 179-188, Bilbao, España, 1997.
- [ChaAna94] S. Chang, D. Anastassiou, A. Eleftheriadis, J. Meng, S. Paek, S. Pejhan and J. R. Smith, "Development of Advanced Image/Video Services in the Video on Demand Testbed", IEEE Visual Signal Processing Communications Workshop, September 1994.
- [ChaLeo94] S. K. Chan and A. Leon-García, "Analysis of Call Interarrival from VBR Video Codecs", Proceedings of the IEEE ICC'91, pp. 350-357, 1994.
- [Chi98] L. Chiariglione, "MPEG-4, why use it?". Disponible en <http://drogo.cselt.it/ufv/leonardo/paper/mpeg-4/mpeg-4.htm>.

- [ChiAna94] T. Chiang and D. Anastassiou, "Hierarchical Coding of Digital Television", *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, no. 5, pp. 38-45, May 1994.
- [ConGre96] M. Conti, E. Gregori and A. Larsson, "Study of the Impact of MPEG-1 Correlations on Video-Sources Statistical Multiplexing", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 1455-1471, September 1996.
- [Cox84] D.R. Cox, "Long-Range Dependence: A Review", in: *Statistics: An Appraisal*, H.A. David and H.T. David (Eds.), The Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 55-74, 1984.
- [CroBes95] Mark E. Crovella and Azer Bestavros, "Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity" Technical Report TR-95-015, Computer Science Department, Boston University, 1995.
- [CruAli97a] L. de la Cruz, J. Alins, E. Pallarès, M. Fernández y J. Mata, "Conformación predictiva de tráfico de vídeo VBR MPEG a partir de su caracterización como proceso ARIMA", *Jornadas de Ingeniería Telemática JITEL'97*, pp. 197-208, Bilbao, España, 1997.
- [CruAli97b] L. de la Cruz, J. J. Alins y J. Mata, "Prediction Techniques for VBR MPEG Traffic Shaping", *Proceedings of IEEE GLOBECOM '97*, vol. 3, pp. 1434-1439, Phoenix, Arizona, USA, 1997.
- [CruAli98a] L. de la Cruz, J. Alins y J. Mata, "Predictive shaping for VBR MPEG video traffic transmission over ATM networks", en *Performance of Information and Communication Systems*, IFIP, Chapman & Hall, 1998.
- [CruAli98b] L. de la Cruz, J. Alins, E. Pallarès y J. Mata, "Modelo Autosemejante para Tráfico de Vídeo VBR MPEG", *XIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI'98*, pp. 551-552, Pamplona, España, 1998.
- [CruFer98] L. de la Cruz, M. Fernández, J. Alins and J. Mata, "Bidimensional Fluid Model for VBR MPEG Video Traffic", en *Broadband Communications: The future of telecommunications*, IFIP, Chapman & Hall, 1997.
- [CruGar96] L. de la Cruz, J. García Haro, J. Mata y J. L. Melús, "Simulador Global para Redes ATM", *Boletín Nacional de la Red Iris*, no. 38, pp. 50-54, 1996.

- [CruPal98] L. de la Cruz, E. Pallarès, J. Alins y J. Mata, "Self-Similar Traffic Generation Using a Fractional ARIMA Model. Application to the VBR MPEG Video Traffic", SBT/IEEE International Telecommunications Symposium, pp. 102-107, Sao Paulo, Brasil, 1998.
- [DalTob97] I. Dalgıç and F. Tobagi, "Performance Evaluation of ATM Networks Carrying Constant and Variable Bit-Rate Video Traffic", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 15, no. 6, Agosto 1997, pp. 1115-1131.
- [DAVIC1] DAVIC, "What is DAVIC?", documento del servidor web oficial del Digital Audio Visual Council, disponible en <http://www.davic.org>.
- [DAVIC2] DAVIC 1.3 Specification Part 1: Description of DAVIC Functionalities, Rev. 6.3, 1997.
- [DecFag91] M. Decino, L. Faglia and T. Toniatti, "Bandwidth Allocation and Selective Discarding for Variable Bit Rate Video and Bursty Data Calls in ATM Networks", Proceedings of the IEEE ICC'91, pp. 1386-1393, 1991.
- [FerCal98] M. Fernández, A. Calvo y J. L. Melús, "El Simulador Global de ATM (SIGLA)", XIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI'98, pp. 641-642, Pamplona, España, 1998.
- [Fis98] W. Fisher, "Broadband Access Networks – a Tutorial", Tutorial en Broadband Communications, BC'98, IFIP, Stuttgart, Alemania, 1998.
- [FuhBou91] S. Fuhrmann and J. le Bouds, "Burst and Cells Level Models for ATM Buffers", ITC-13, pp. 975-980, 1991.
- [Gal91] D. Le Gall. "MPEG: A Video Compression Standard for Multimedia Applications", Communications of the ACM, vol 34, no. 4, pp. 305-313, April 1991.
- [Gar92] J. García Vidal, "Modelos Analíticos para la Evaluación de Mecanismos de Control de Tráfico en Redes ATM", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 1992.
- [Gar93] M. W. Garret, "Contributions Toward Real-Time Services on Packet-Switched Networks", Ph. D. Dissertation CU/CTR/TR 340-93-20, Columbia University, May 1993.

- [Gar95] J. García Haro, "Contribución a la Evaluación y Diseño de Conmutadores Rápidos de Paquetes Basados en el Modo de Transferencia Asíncrono", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 1994.
- [GarWil94] M. W. Garret and W. Willinger, "Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic", Proceeding of the ACM SIGCOMM'94, Reprinted Version, 1994.
- [GihGia91] O.Gihr and P. Tran-Gia, "A Layered Description of ATM Cell Traffic Streams and Correlation Analysis", Proceedings of the IEEE INFOCOM'91, pp.137-142, 1991.
- [GilOrt97] A. Gillespie, B. Orth, A. Profumo y S. Webster, "Evolving Access Networks: A European Perspective", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 3, pp. 47-54, Marzo 1997.
- [Gra97] M. Graf, "VBR Video over ATM: Reducing Network Resource Requirements through Endsystem Traffic Shaping", Proceedings del IEEE INFOCOM'97, pp. 48-57, 1997.
- [GraJoy80] C.W.J.Granger and R.Joyeux, "An Introduction to Long-Memory Time Series Models and Fractional Differencing", J. Time Series Anal. 1, pp.15-29, 1980.
- [GriKha98] S. Gringeri, B. Khasnabish, A. Lewis, K. Shuaib, R. Egorov y B. Basch, "Transmission of MPEG-2 Video Streams over ATM", IEEE Multimedia Magazine, pp. 58-71, Enero-Marzo 1998.
- [GroKes97] M. Grossglauser, S. Keshav y N. C. Tse, "RCBR: A Simple and Efficient Service for Multiple Time-Scale Traffic", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 5, no. 6, Diciembre 1997, pp. 741-755.
- [GruCos91] Grunenfelder, Cosmas, Manthroe and Odinma-Okafor, "Characterization of Video Codecs as Autoregressive Moving Average Processes and Related Queueing System Performance", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 9, no. 3, pp. 284-292, April 1991.
- [HofWeb85] H.Hofstetter and D. Weber, "Traffic Models for Large ISDN-PABX'S", ITC-11, pp. 15-21, 1985.
- [Hos81] J.R.M. Hoskings, "Fractional Differencing", Biometrika 68, 165-176, 1981.

- [Hos84] J.R.M.Hoskings, "Modeling persistence in hydrological time series using fractional differencing" in *Water Resources Res.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1898-1908, 1984.
- [HsuOrt97] C.-Y. Hsu, A. Ortega and A. R. Reibman, "Joint Selection of Source and Channel Rate for VBR Video Transmission Under ATM Policing Constraints" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 6, Agosto 1997, pp. 1016-1028.
- [HuaDev95] C.Huang, M.Devetsikiotis, I.Lambdakis i A.R.Kaye, "Selfsimilar modeling of VBR compressed video: A unified approach" in *Proc. ACM Sigcomm'95*, Cambridge, MA, 1995, pp. 114-125.
- [Hui90] J. Y. Hui, "Switching and Traffic Theory for Integrated Broadband Networks", Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [I.113] VOCABULARY OF TERMS FOR BROADBAND ASPECTS OF ISDN, Recommendation I.113, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.121] BROADBAND ASPECTS OF ISDN, Recommendation I.121, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.211] B-ISDN SERVICE ASPECTS, Recommendation I.211, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.321] B-ISDN PROTOCOL REFERENCE MODEL AND ITS APPLICATION, Recommendation I.321, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.361] B-ISDN ATM LAYER SPECIFICATION, Recommendation I.361, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.362] B-ISDN ATM ADAPTATION LAYER (AAL) FUNCTIONAL DESCRIPTION, Recommendation I.362, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.363] B-ISDN ATM ADAPTATION LAYER (AAL) SPECIFICATION, Recommendation I.363, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.413] B-ISDN USER-NETWORK INTERFACE, Recommendation I.413, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.432] B-ISDN USER-NETWORK INTERFACE PHYSICAL LAYER SPECIFICATION, Recommendation I.432, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.F720] SERVICIOS DE VIDEOTELEFONÍA - GENERALIDADES, Recomendación UIT-T F.720, CCITT & ITU, Geneva, 1992.

- [I.F730] SERVICIOS DE VIDEOCONFERENCIA - GENERALIDADES, Recomendación UIT-T F.730, CCITT & ITU, Geneva, 1992.
- [I.J81] TRANSMISION OF COMPONENT-CODED DIGITAL TELEVISION SIGNALS FOR CONTRIBUTION-QUALITY APPLICATIONS AT THE THIRD HIERARCHICAL LEVEL OF ITU-T RECOMMENDATION G.702, Recommendation ITU-T J.81 (CCIR 727), CCITT & ITU, 1993.
- [I.J82] ITU-T, "Transport of MPEG-2 Constant Bit Rate Television Signals in B-ISDN", Rec. J.82, 1996.
- [I.R601] ENCODING PARAMETERS OF DIGITAL TELEVISION FOR STUDIOS, Recommendation ITU-R.601, CCITT & ITU, 1972.
- [Kar96] G. Karlsson, "Asynchronous Transfer of Video", IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 8, pp. 118-126, 1996.
- [Kar98] G. Karlsson, "Video Communication for Packet – Switched Networks", Tutorial en Performance for Information and Communications Systems PICS'98, IFIP, Lund, Suecia, 1998.
- [KawChe93] M. Kawashima, C. Chen, F. Jeng, S. Singhal, "Adaptation of MPEG Video-Coding Algorithm to Network Applications", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 3, no. 4, pp. 261-269, August 1993.
- [Kou95] W. Kou, "Digital Image Compression Algorithms and Standards", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [LamCho96] S. S. Lam, S. Chow and D. K. Y. Yau, "A Lossless Smoothing Algorithm for Compressed Video", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 4, no. 5, pp. 697-708, 1996.
- [LauErr95] W-C Lau, A. Erramilli, J. L. Wang i W. Willinger, "Self-Similar Traffic Generation: The Random Midpoint Displacement Algorithm and Its Properties" in Proc IEEE INFOCOM'95, pp.466-472, 1995.
- [Lee98] J. Y. B. Lee, "Parallel Video Server: A Tutorial", IEEE Multimedia Magazine, pp. 20-28, Abril-Junio 1998.
- [LelTaq93] W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger y D.V.Wilson "On the selfsimilar nature of ethernet traffic" in Proc. ACM Sigcomm'93, San Francisco, CA, 1993, pp.183-193.

- [LelTaq94] W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger y D.V.Wilson "On the selfsimilar nature of ethernet traffic (extended version)" IEE/ACM Trans. Networking, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, 1994.
- [LiaLi97] W. Liao, V. Li, "The Split and Merge Protocol for Interactive Video on Demand" IEEE Multimedia Magazine, pp. 51-62, Octubre-Diciembre 1997.
- [LiCho95] S. Li, S. Chong y C. Hwang, "Link Capacity Allocation and Network Control by Filtered Input Rate in High-Speed Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 3, no. 1, pp. 10-25, 1995.
- [LieCha97] S. Liew y H. Chan, "Lossless Aggregation: A Scheme for Transmitting Multiple Stored VBR Video Streams over a Shared Communication Channel Without Lost of Image Quality", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 15, no. 6, Agosto 1997, pp. 1181-1189.
- [LieTse96] S. Liew y C. Tse, "Video Aggregation: Adapting Video Traffic for Transport Over Broadband Networks by Integrating Data Compression and Statistical Multiplexing", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 6, Agosto 1996, pp. 1123-1137.
- [LieTse98] S. Liew y C. Tse, "A Control-Theoretic Approach to Adapting VBR Compressed Video for Transport over a CBR Communication Channel", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 6, no. 1, Febrero 1998, pp. 42-55.
- [MagAna88] B. Maglaris, D. Anastassiou, P. Sen, G. Karlsson, J.D. Robbins, "Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications", IEEE Transactions on Communications, vol. 36, no. 7, pp. 834-843, July 1988.
- [Mat96] J. Mata, "Contribución a la Gestión Dinámica de Recursos aplicada al Control de Fuentes de Vídeo de Velocidad Variable en la Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 1996.
- [MatPag96] J. Mata, G. Pagán y S. Sallent, "Multiplexing and Resource Allocation of VBR MPEG Traffic on ATM Networks", Proceedings del IEEE ICC'96, vol. 3, pp. 1401-1405, Junio 1996.
- [MeiWir91] K.Meier-Hellstern, P.E.Wirth, Y.L.Yan y D.A.Hoefflin "Traffic models for ISDN data users: Office automation application" en Teletraffic and Data Traffic in a Period of Change (proc. 13th ITC, Copenhagen, 1991), A. Jensen y V.B. Iversen, Eds., North Holland, 1991, pp. 167-172.

- [MPEG1] CODING OF MOVING PICTURES AND ASSOCIATED AUDIO FOR DIGITAL STORAGE MEDIA AT UP TO ABOUT 1.5 Mbps, ISO/IEC 11172-2, November 25, 1991.
- [MPEG2_1] ISO/IEC 13818-1, "Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems", 1997.
- [MPEG2_2] ISO/IEC 13818-2, "Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video", 1996.
- [MPEG2_3] ISO/IEC 13818-2, "Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Audio", 1998.
- [OrzSom98] M. Orzessek y P. Sommer, "ATM & MPEG-2. Integrating digital video into broadband networks", Hewlett-Packard Professional Books, Prentice Hall, 1998
- [Pal97] J. Palmes Bosch, "Ubicación de recursos en redes ATM con tráfico VBR", Proyecto Final de Carrera, ETS de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 1997.
- [PanZar94] P. Pancha, M. El Zarki, "MPEG Coding For Variable Bit Rate Video Transmission", IEEE Communications Magazine, vol. 32, no. 5, pp. 54-66, May 1994.
- [PaxFlo95] V. Paxson and S.Floyd "Wide area traffic: The failure of poisson modeling" IEEE/ACM Trans. Networking, vol.3, pp. 226-244, 1995.
- [Pro83] Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, New York, 1983.
- [Pry93] M. de Prycker, "Asynchronous Transfer Mode. Solution for Broadband ISDN", Second Edition, Ellis Horwood, 1993.
- [Rei93] D. Reininger et al, "Statistical Multiplexing of VBR MPEG Compressed Video on ATM Networks", Proceedings of the IEEE INFOCOM '93, pp. 919-926, March 1993.
- [ReiBer92] A. R. Reibman y A. W. Berger, "On VBR Video Teleconferencing over ATM Networks", Proceedings of the IEEE ICC'92, pp. 314-319, 1992.
- [ReiRam95] D. Reiniger, G. Ramamurthy y D. Raychaudhuri, "VBR MPEG Video Coding with Dynamic Bandwith Renegotiation", IEEE International Conference on Communications, Junio 1995, pp. 1773-1777.

- [ReiRay96] D. J. Reininger y D. Raychaudhuri, "Bandwith Renegociation for VBR Video Over ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 6, Agosto 1996, pp. 1076-1086.
- [Ron94] J. I. Ronda Prieto, "Modelado estadístico y control de codificadores de vídeo", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.
- [RosFra94] O. Rose and M. Frater, "Impact of MPEG Video Traffic on an ATM Multiplexer", *Proceedings of the IFIP HPN '94*, pp. 157-166, 1994.
- [SalZha98] J. Salehi, Z. Zhang, J. Kurose y D. Towsley, "Supporting Stored Video: Reducing Rate Variability and End-to-End Resource Requirements Through Optimal Smoothing", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 4, Agosto 1998, pp. 397-410.
- [Sch96] M. Schwartz, "Broadband Integrated Networks", Prentice Hall, 1996.
- [SimRos93] M. Simón, M. Roser, P. Villegas y A. Viante, "Esquemas de codificación para transmisión de vídeo con calidad aproximadamente constante", *Comunicaciones de Telefónica I+D*, vol. 4, no. 1, pp. 76-80, Enero-Junio 1993.
- [Swe97] W. Sweet, "Chiariglione and the birth of MPEG", *IEEE Spectrum*, pp. 70-77, Sept. 1997.
- [Tho98] J. Thompson, "What is DAVIC?", 21st DAVIC Meeting, Kuala Lumpur, 1998.
- [TseGal95] D. Tse, R. Gallager, y J. Tsitsiklis, "Statistical Multiplexing of Multiple Time-Scale Markov Streams", *IEEE Journal on Selected Areas in Communciations*, vol. 13, Agosto 1995, pp. 1028-1038.
- [TsyGeo97] B. Tsybakov and N. Georganas, "On Self-Similar Traffic in ATM Queues: Definitions, Overflow Probability and Cell Delay Distribution", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 397-409, 1997.
- [UNI3.0] ATM: User-Network Interface Specification, Version 3.0, The ATM Forum, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1993.
- [Wan94] L. Wang, "Bit Rate Control for Hybrid DPCM/DCT Video Codec", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 509-517, October 1994.
- [Wan98] J. L. Wang, "Analysis, Modeling and Management of Self-Similar Traffic", Tutorial en SBT/IEEE International Telecommunication Symposium, Sao Paulo, Brasil, 1998.

- [Wri97] D. J. Wright, "Assessment of Alternative Transport Options for Video Distribution and Retrieval over ATM in Residential Broadband", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 12, Diciembre 1997, pp. 78-87.
- [YegJab93] F. Yegenoglu, B. Jabbari and Y. Zhang, "Motion Classified Autoregressive Modeling of Variable Bit Rate Video", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 42-53, February 1993.
- [ZhaKni97] H. Zhang y E. Knightly, "RED-VBR: a renegotiation-based approach to support delay-sensitive VBR video", *ACM Multimedia Syst. J.*, vol. 5, no.3, pp. 164-176, mayo 1997.
- [ZhaKur97] Z.-L. Zhang, J. Kurkose, J. D. Salehi and D. Towsley, "Smoothing, Statistical Multiplexing, and Call Admission Control for Stored Video", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 6, Agosto 1997, pp. 1148-1166.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA