

Resumen del proyecto “Transcodificación adaptativa en tiempo real de canales de vídeo DVB-S para transmisión sobre redes inalámbricas IEEE 802.11x”

Rafael Asorey Cacheda

1. Introducción

En este proyecto se ha integrado un *servicio de televisión digital móvil en redes IEEE 802.11x*. El principal de los problemas que hubo que resolver fue que este tipo de redes nunca se concibieron como medios para la distribución de vídeo y por lo tanto, se trabajó en el desarrollo de una arquitectura que garantizase el buen funcionamiento del sistema de distribución de televisión digital móvil.

El proyecto se centra en los siguientes aspectos:

- Captura y transcodificación de vídeo para que se pueda adaptar a las necesidades del usuario, tanto a las capacidades del dispositivo de visualización como a las prestaciones de la red.
- Señalización de la modulación que recibe el usuario hacia el servidor de contenidos. De esta manera, se establece un canal de comunicación que permite al servidor variar las condiciones de transcodificación en tiempo real.
- Simulación de escenarios con múltiples canales y múltiples escenarios con el objetivo de dimensionar las capacidades del sistema y determinar cuáles son los requisitos mínimos para poder ofrecer un servicio de contenidos con garantías.

Los resultados más notables de este proyecto son los siguientes:

- Publicación de los resultados de investigación obtenidos en cuatro congresos internacionales y en una revista nacional. El contenido de todos estos artículos se pueden encontrar en los anexos incluidos con este documento (Anexos I, II, III, IV, V).
- Obtención de financiación de tres proyectos de financiación pública, uno de ellos la Red de Excelencia Satnex del VI Programa Marco de la Unión Europea. Esta información se puede encontrar detallada en el Anexo VI.

2. Prototipo de transcodificación de vídeo

2.1. Hardware empleado

Para la realización del prototipo de transmisión de vídeo se utilizó el siguiente equipamiento:

- Un servidor (Figura 1) equipado con una tarjeta de recepción de satélite conectada a una antena parabólica que recibía señal del satélite de comunicaciones Hispasat 1C. Este servidor, con sistema operativo Linux, actuaba además como transcodificador y servidor de flujos a los clientes.
- Una PDA (Figura 1) equipada con una tarjeta inalámbrica, que disponía de un reproductor de vídeo para evaluar la calidad subjetiva de los flujos generados, así como para identificar las distintas áreas de cobertura en las pruebas que se llevaron a cabo.
- Dos puntos de acceso IEEE 802.11b para las pruebas de cobertura, de cambio de modulación y de *roaming*.



Figura 1: Transcodificador conectado al satélite y PDA usada como terminal

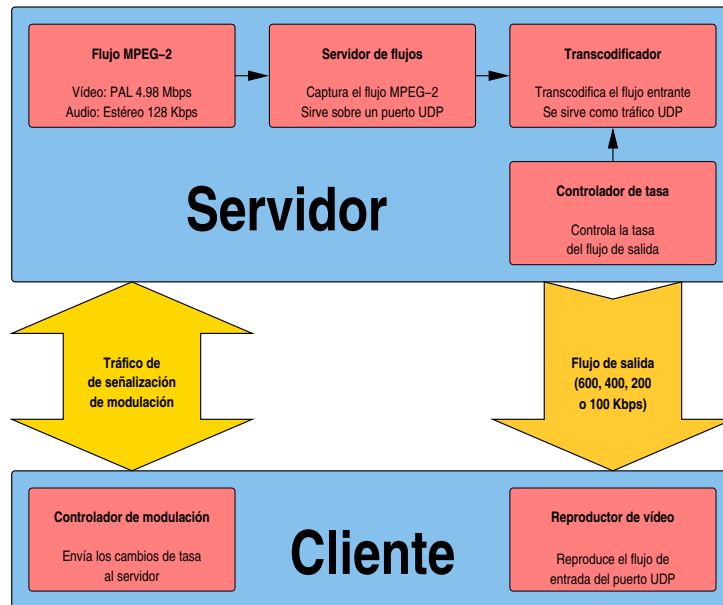


Figura 2: Esquema de la arquitectura del prototipo de pruebas

- Un ordenador portátil equipado con una tarjeta inalámbrica y con sistema operativo Linux. Sobre este ordenador se desarrolló el software para la parte del cliente.

2.2. Arquitectura

La arquitectura del sistema se basa en una concepción modular de cada uno de los componentes del prototipo. La arquitectura de comunicación sigue el modelo clásico cliente-servidor, en el que el usuario del servicio debe obligatoriamente conectarse al servidor para tener acceso.

En la Figura 2 se puede observar el esquema de la implementación del prototipo. Siguiendo el modelo cliente-servidor se puede observar que la parte del servidor está dividida en tres partes diferenciadas y que el cliente se divide a su vez en otras dos.

2.2.1. Servidor

1. *Servidor de flujos*: El servidor de flujos se encarga de sintonizar la tarjeta receptora de satélite, capturar los flujos de vídeo y audio del canal que se le indique, combinar estos dos flujos en uno

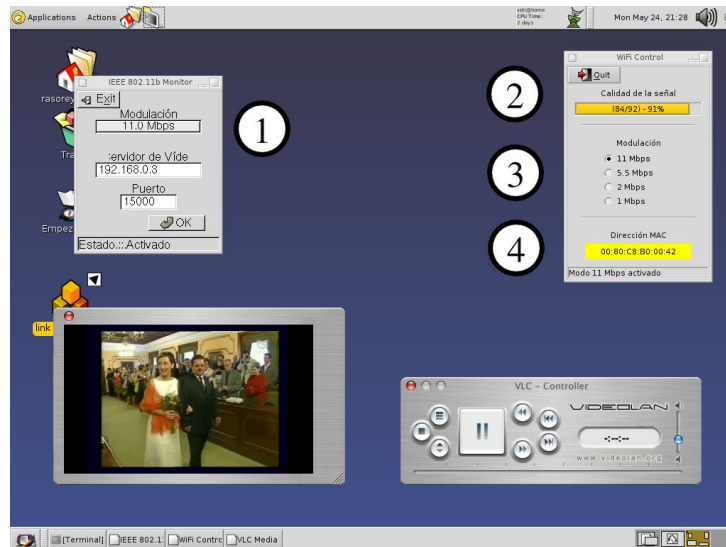


Figura 3: Captura de pantalla de la aplicación cliente en funcionamiento

y escribir este flujo en la salida estándar (*stdout*). Para este propósito se eligió la herramienta *dvbstream* que viene de serie con los *drivers* para Linux de la tarjeta receptora de satélite.

2. *Transcodificador*: Para el transcodificador se optó por la aplicación *ffmpeg* de código abierto. Permite convertir flujos MPEG-2 en flujos MPEG-1 y admite como entradas *sockets* UDP.
3. *Controlador de tasa*: El controlador de tasa es una aplicación que permanece a la escucha en un puerto TCP a la espera de una conexión por parte de un cliente. Una vez que se produce la conexión, el controlador invoca al transcodificador para que produzca un flujo de vídeo a la tasa adecuada. Cada vez que se produce un cambio de modulación, el cliente se lo notifica al controlador mediante la conexión que se ha abierto anteriormente. Cuando se produce un evento de estas características, el controlador detiene el transcodificador y lo reinicia para que genere de nuevo un flujo a la tasa adecuada. Además, debido a las características del servidor de flujos, para evitar cortes en la transmisión y para hacer posible la modularización del sistema de tal manera que el transcodificador pueda estar en otro equipo, junto al controlador existe otra aplicación que funciona a modo de búfer. Este búfer se encarga de recoger por la entrada estándar (*stdin*) la salida del servidor de flujos y servirla a un *socket* UDP en la dirección que se le indique. En las primeras versiones, cada vez que se producía un cambio de modulación era necesario resintonizar la tarjeta capturadora, tarea que requiere varios segundos. Al introducir el búfer, la transición se volvió imperceptible, y lo único que se podía apreciar era un cambio en la calidad subjetiva del flujo servido.

2.2.2. Cliente

1. *Controlador de modulación*: El controlador de modulación (punto 1 de la Figura 3) se encarga de monitorizar la modulación en la tarjeta del cliente y de comunicar al servidor los cambios que se detecten. Para ello, el usuario ha de iniciar la conexión con el servidor previamente. Esta tarea se puede realizar introduciendo la dirección IP y el puerto remoto del servidor en el propio interfaz de la aplicación. A partir de la apertura de la conexión, el cliente invoca el reproductor de vídeo que recibirá el flujo generado por el transcodificador en la parte del servidor.
2. *Reproductor de vídeo*: Como reproductor de vídeo se tomó la decisión de utilizar la aplicación *vlc*, que es un reproductor de código abierto que cumple con todos los requisitos necesarios para el desarrollo del prototipo. El controlador de modulación invoca esta aplicación cuando se produce una conexión con el servidor de vídeo.

Tasa	Radio (m)	Área (m ²)	Probabilidad
11 Mbps	125	49087,38	0,54
5,5 Mbps	125 - 140	12487,83	0,14
2 Mbps	140 - 150	9110,62	0,10
1 Mbps	150 - 170	20106,19	0,22

Cuadro 1: Cobertura del punto de acceso

2.2.3. Monitor y generador de cambios de modulación:

Con el objetivo de facilitar las pruebas del prototipo diseñado se desarrolló también una aplicación que permitiera monitorizar la modulación y calidad de la señal y, en caso necesario, provocar un cambio en la modulación de manera controlada y sin necesidad de mover el ordenador portátil de pruebas.

En la Figura 3 esta aplicación se corresponde con los puntos 2, 3 y 4. Las principales características de la aplicación son las siguientes:

- En el punto 2 se refleja la calidad de la señal inalámbrica. Es importante clarificar que la calidad y la potencia son cosas distintas. Mientras que la potencia recibida depende únicamente de la distancia a la antena del punto de acceso, la calidad de la señal depende también de la modulación empleada. Así, si mantenemos fija la potencia, la calidad de la señal aumentará si utilizamos modulaciones con tasas binarias más bajas debido a que disminuimos la probabilidad de error. Por este motivo, y porque el criterio que se emplea para decidir un cambio de modulación es el de la calidad de la señal, se decidió incluir esta información en la aplicación.
- El punto 3 cumple dos funciones. Por un lado se informa de la modulación que está empleando la tarjeta inalámbrica en ese momento. Por otro lado, también nos permite seleccionar la modulación máxima que vamos a permitir. De esta manera es posible simular un cliente en movimiento desde un punto estático.
- En el punto 4 se puede visualizar la dirección MAC del punto de acceso. Esta información es útil para las pruebas de *roaming* y así saber cuándo el cliente cambia de un punto de acceso a otro. Para facilitar esta tarea sin necesidad de leer la dirección MAC, se utilizan también códigos de colores que cambian con cada punto de acceso.

3. Planificador de canales *multicast*

3.1. Base matemática y suposiciones

El modelo está basado en varias suposiciones sencillas:

- El comportamiento de los usuarios es independiente. Suponemos que cuando un usuario decide entrar en el sistema o abandonarlo no afecta al comportamiento de los otros usuarios.
- El tiempo que transcurre entre dos peticiones consecutivas de usuarios se modela mediante una distribución exponencial de parámetro λ (el tiempo medio entre dos peticiones será $\gamma = \lambda^{-1}$).
- El tiempo de visualización de un canal se distribuye exponencialmente con media μ , de tal manera que el tiempo medio durante el que un usuario está conectado a un canal será $S = \mu^{-1}$.

Las peticiones pueden venir desde cualquier punto dentro del rango de cobertura del punto de acceso, y la tasa de transmisión de una petición determinada dependerá de la localización de la que provenga. La Tabla 1 muestra las probabilidades de transmisión para un punto de acceso IEEE 802.11b o que se han empleado en la simulación. A partir de la Tabla 1 se deduce que la probabilidad de que una petición llegue desde cualquiera de estas zonas será proporcional a su área.

Otro factor importante a tener en cuenta es la popularidad de los canales. De hecho, no se puede suponer que todos los canales tengan la misma popularidad, y por eso supondremos que las peticiones a los canales siguen una *función de preferencia*. Para este propósito usamos una distribución Zipf.

Las nuevas peticiones que llegan a un canal que se sirve a una de las modulaciones siempre se atienden. Sin embargo, una petición puede ser *bloqueada* si el ancho de banda de transmisión es insuficiente. Si definimos la *probabilidad de bloqueo multicast* como B_{mc} , la *probabilidad de bloqueo de un canal i* como B_c^i y la *probabilidad de bloqueo de un canal en la zona de X Mbps* como $B_c^{i,X}$, entonces:

$$B_{mc} = \sum_{i=1}^I a_i B_c^i \quad (1)$$

$$B_c^i = p(r=1)B_c^{i,1} + p(r=2)B_c^{i,2} + p(r=5,5)B_c^{i,5,5} + p(r=11)B_c^{i,11}, \quad (2)$$

donde $p(r=X)$ es la *probabilidad de la localización de un usuario en la zona de X Mbps* obtenida en la Tabla 1. Si $n_{Bloqueados}^{i,X}$, $n_{Expulsados}^{i,X}$ y $n_{Total}^{i,X}$ representan respectivamente el número de peticiones bloqueadas, usuarios expulsados y número total de peticiones en el canal i en la zona de X Mbps, tenemos que:

$$B_c^{i,X} = \frac{n_{Bloqueados}^{i,X}}{n_{Total}^{i,X}} \quad (3)$$

Si $E_c^{i,X}$ es la *probabilidad de expulsión de un usuario de un canal activo i en la zona X* , entonces:

$$E_c^{i,X} = \frac{n_{Expulsados}^{i,X}}{n_{Total}^{i,X}}, \quad (4)$$

y de esta manera obtenemos la *probabilidad de expulsión multicast*, E_{mc} , de manera similar a cómo se obtuvo B_{mc} , de 2 y 3.

$$E_c^i = p(r=1)E_c^{i,1} + p(r=2)E_c^{i,2} + p(r=5,5)E_c^{i,5,5} + p(r=11)E_c^{i,11} \quad (5)$$

$$E_{mc} = \sum_{i=1}^I a_i E_c^i \quad (6)$$

3.2. Algoritmo de planificación

Existen dos posibilidades para intentar conseguir probabilidades de bloqueo y expulsión próximas a 0. La primera consiste en evitar las tasas de transmisión más bajas colocando los puntos de acceso más próximos entre si. Es importante darse cuenta de que esta estrategia conlleva una disminución del número de peticiones, puesto que el área que cubre cada punto de acceso es más pequeña y la densidad de usuarios la misma. La segunda estrategia consiste en situar varios puntos de acceso en la misma localización utilizando distintas bandas, con lo que aumentamos la capacidad de la red proporcionalmente al número de bandas. Cualquiera de estas dos estrategias requiere planificación de frecuencias de acuerdo con los estándares IEEE 802.11 (especialmente la segunda) para reducir al máximo la interferencia entre bandas. Una tercera opción sería utilizar una combinación de estas dos soluciones. Todas estas soluciones tienen el inconveniente de que la planificación de frecuencias es compleja. Sin embargo, la superposición de puntos de acceso es más problemática que la eliminación de modulaciones, porque en el primer caso se emplea un mayor número de frecuencias (evitar el solapamiento de canales no siempre es posible). En el segundo caso no aumenta el número de frecuencias (es posible evitar el solapamiento), aunque puede suceder que, si los puntos de acceso están demasiado próximos entre si, dos puntos de acceso en zonas no contiguas operando en la misma frecuencia puedan interferirse.

Se debe también recordar que, cuando se usan varios puntos de acceso, el número máximo de canales crece *casi* linealmente con el número de bandas, porque la transmisión de un canal no se puede fragmentar entre distintas bandas. El *algoritmo de planificación de canales* propuesto pretende maximizar el número de canales *multicast*. Consta de los siguientes pasos:

1. Si un usuario solicita un canal que está activo en la zona X y puede ser recibido en su localización, se procede a unir al usuario al grupo *multicast* de dicho canal.

2. Si el canal no está activo y existe ancho de banda disponible, el servidor inicia la transmisión de este nuevo canal *multicast* y el usuario se unirá a él. Si n_{AP}^i es el número de canales que sirve el punto de acceso i -ésimo, K es la tasa de transmisión del canal y β es el porcentaje del modo PCF cuando un usuario en la región de X Mbps solicita un canal, existirá espacio en el punto de acceso i -ésimo si:

$$\frac{\beta \times X}{1 + n_{AP}^i} \geq K \quad (7)$$

3. Si no hay suficiente espacio disponible, el servidor busca un canal activo a la tasa más baja posible, $Y < X$, y con menor audiencia, envía un mensaje de aviso a los usuarios de ese canal y lo asigna a la nueva petición.
4. Finalmente, la nueva petición puede bloquearse si no es posible encontrar un canal que se pueda ser finalizar. Como se dijo antes, con una planificación adecuada, es posible evitar este extremo.

Cabe discutir aquí sobre la bondad o no de expulsar usuarios del sistema. Está claro que siempre será algo a evitar, pero la cuestión sobre la que se debe reflexionar es si permitiendo cierta flexibilidad que nos permita expulsar puntualmente a ciertos usuarios del sistema puede mejorar su comportamiento global. El problema que se plantea al tener usuarios en las zonas de tasas de transmisión bajas es que dichos usuarios son costosos desde el punto de vista de utilización del ancho de banda. Por lo tanto, la respuesta es que permitiendo cierta relajación con una probabilidad de expulsión muy baja se puede mejorar el comportamiento global.

4. Conclusiones

4.1. Prototipo de transcodificación

El prototipo de transcodificación se concibió con el objetivo de demostrar las posibilidades de la tecnología. A efectos prácticos se demuestra plenamente que es posible implementar servicios de vídeo en tiempo real en dispositivos móviles a través de redes IEEE 802.11.

Los principales problemas encontrados en el desarrollo del prototipo fueron los relacionados directamente con el funcionamiento del hardware. En concreto, el principal problema estuvo relacionado con la transición entre modulaciones. Teóricamente, el mecanismo de transición debería funcionar correctamente, pero en la práctica es un problema conocido y documentado de IEEE 802.11. De hecho, este es uno de los problemas que se pretenden solucionar en el futuro estándar IEEE 802.11n, aunque las primeras pruebas no han sido demasiado satisfactorias.

4.2. Simulaciones

Las simulaciones se realizaron con el objetivo de estudiar algoritmos de planificación para distribuir vídeo en redes inalámbricas IEEE 802.11b. Los resultados mostraron que, teóricamente, el algoritmo finalmente propuesto proporciona unas prestaciones aceptables para los criterios de calidad impuestos previamente.

De todas maneras, hay que tomar los resultados con cautela puesto que el modelo simulado es una aproximación de un escenario real y hace suposiciones tales como que el comportamiento de los usuarios en cada escenario es uniforme, que los usuarios se distribuyen uniformemente dentro del área de cobertura, etc.

Sin embargo, la mayor parte de las aproximaciones realizadas son de carácter pesimista. Por ejemplo, cuando se produce un bloqueo suponemos que el usuario abandona el sistema y no hace nada más. En un escenario realista, probablemente el usuario intentaría conectarse a otro canal con una popularidad mayor y con menos probabilidad de sufrir bloqueo, con lo que la satisfacción media del servicio aumentaría. Por otro lado, suponemos también que los usuarios están repartidos uniformemente por toda la zona de cobertura. Sin embargo, esto no es del todo cierto en la realidad. Para empezar, es lógico que los usuarios estén en una posición cuasi-estática. Debido a esto, para recibir el vídeo con mejor calidad y menos cortes, los usuarios tenderán a agruparse en las zonas de máxima cobertura, con lo que los resultados que se obtendrían deberían ser mejores que los esperados.

Resultados

1. Pruebas con el prototipo

En la fase de pruebas del prototipo se realizaron numerosos ensayos para evaluar las prestaciones y localizar los problemas que se podían presentar. Básicamente, las pruebas realizadas se pueden clasificar en tres tipos distintos:

- *Pruebas de cambio de modulación:* El objetivo de estas pruebas era comprobar que el cliente era capaz de detectar un cambio de modulación y notificárselo al servidor. Como consecuencia del cambio se debería producir un cambio en la tasa del vídeo transmitido hacia el cliente.
- *Pruebas de cambio de punto de acceso:* El objetivo de estas pruebas era probar el funcionamiento del *roaming* y la manera en que esto afectaba al cliente. En esta fase no se quería forzar un cambio de modulación, sino que simplemente se pretendía obligar al cliente a cambiar de punto de acceso manteniendo la misma modulación y comprobar que no ocurría ningún cambio en la transcodificación.
- *Pruebas combinadas de cambio de modulación y punto de acceso:* Este tipo de pruebas no eran otra cosa que una combinación de las otras dos para probar que el funcionamiento completo del prototipo.

2. Pruebas de cambio de modulación

Las pruebas consistieron en, una vez iniciada una sesión de transcodificación, mover el cliente por la zona de cobertura entre distintas zonas de modulación. Al mismo tiempo se monitorizaba la modulación entre el cliente y el punto de acceso y se observaba lo que ocurría cuando esta cambiaba. Otra estrategia distinta consistió en la utilización de la aplicación de monitorización y generación de cambios de modulación. Así, también era posible desde una posición estática forzar cambios en la modulación sin necesidad de moverse.

Los resultados obtenidos fueron coherentes con el diseño del prototipo pero dejaron entrever algunos de los problemas que tiene IEEE 802.11, o al menos los dispositivos hardware diseñados para este estándar. Así, cuando se hacían las pruebas desplazando el cliente por la zona de cobertura, en numerosas ocasiones era fácil observar por la calidad subjetiva del vídeo y por la calidad de la señal que mostraba la aplicación de monitorización que el sistema no cambiaba de modulación en los momentos adecuados. Cuando el cambio se produce de una modulación inferior hacia una superior no hay problema porque el flujo de vídeo no sufrirá cortes aunque la calidad se degrada durante un lapso. Sin embargo, cuando pasamos de una modulación superior a una inferior debido a la mala calidad de la señal inalámbrica, el vídeo sufrirá fallos e interrupciones hasta que el sistema detecte que hay que cambiar la modulación y la situación se estabilice. Cabe decir que, en cuanto se producía un cambio de modulación, el cliente lo notificaba al servidor y se producía automáticamente un cambio en la tasa de codificación del vídeo transmitido. Así como se encontraron problemas cuando se hicieron las pruebas con el cliente en movimiento, cuando se realizaron de manera estática con el generador de cambios de modulación las transiciones entre una modulación y otra eran suaves, percibiéndose únicamente una variación en la tasa de codificación y en la calidad subjetiva de la imagen de vídeo que se recibía en el cliente.

2.1. Pruebas de cambio de punto de acceso

La metodología seguida para realizar estas pruebas consistió en utilizar dos puntos de acceso configurados en distintas bandas no solapadas. Estos dos puntos de acceso estaban colocados en la misma zona, de tal manera que un cliente en una posición estática pudiera recibir la misma potencia de los dos puntos de acceso y, por consiguiente, utilizar la misma modulación en ambos casos.

El proceso de pruebas consistía en iniciar una sesión de transcodificación entre el cliente y el servidor. A continuación se observaba a cuál de los dos puntos de acceso estaba conectado el cliente y, finalmente, se forzaba el cambio de punto de acceso de manera manual en el cliente. Este cambio manual se puede hacer de manera muy sencilla con la ejecución simple de un comando que indica simplemente la dirección MAC del punto de acceso al que queremos conectarnos.

Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron siempre satisfactorios, ya que los cambios de punto de acceso que no implicaban cambio de modulación no generaron nunca ningún efecto colateral como cortes en la transmisión o cambios en la tasa de codificación del vídeo en el servidor.

2.2. Pruebas combinadas

Para combinar las dos pruebas anteriores se usaron dos puntos de acceso situados en la misma localización. Sin embargo, en este caso, en uno de ellos estaba limitada su modulación mínima a 5,5 Mbps. De esta manera, dentro de la zona de 11 y 5,5 Mbps podríamos usar cualquiera de los dos puntos de acceso, pero fuera de esta zona sólo será posible utilizar uno de los dos. Así conseguimos forzar simultáneamente un cambio de modulación y de punto de acceso.

En todas estas pruebas los resultados demostraron que el funcionamiento del prototipo era el correcto. Sin embargo, hay que repetir lo dicho en el apartado anterior con respecto a los problemas observados respecto al tiempo que necesita el hardware para detectar un cambio de modulación.

3. Simulaciones

El software de simulaciones se ha diseñado para modelar el funcionamiento de un servicio de transcodificación de vídeo con un número determinado de canales y una población de usuarios que demanda conexiones a uno de estos canales siguiendo una distribución de llegadas poissonianas.

La probabilidad de selección de un canal sigue una distribución Zipf. Por este motivo, la probabilidad de bloqueo será siempre más baja que si la distribución de popularidades fuera uniforme. Los valores utilizados para la simulación fueron $\alpha = 0,6$ y $\alpha = 0,8$, que son los valores típicos entre los que se mueven estas distribuciones. Además se utilizaron los valores de 10, 20, 30 y 40 para el número de canales.

Para simular el comportamiento de los usuarios se prefirió utilizar la variable de ocupación en vez de las tasas de llegadas y el tiempo de permanencia en el sistema.

3.1. Resultados

En cada localización de puntos de acceso puede haber 1, 2 o 3 puntos de acceso configurados en diferentes bandas. Además, la densidad de puntos de acceso también puede variar dependiendo de la tasa mínima de operación de los puntos de acceso (1, 2, o 5,5 Mbps). Esta densidad está reflejada en la Tabla 1. La ocupación del sistema varía entre 0,1 y 0,9. Finalmente, la tasa de los canales de vídeo se considera de 400 Kbps, incluyendo el ancho de banda ocupado por las cabeceras.

En los experimentos realizados se consideraron todas las posibles combinaciones de puntos de acceso en cada localización, tasas binarias y canales de vídeo. La Tabla 2 muestra las configuraciones que cumplen el objetivo de bloqueo y expulsión cero para $p \leq 0,8$. Este objetivo no se puede conseguir cuando se permiten tasas mínimas de 1 Mbps y, en el caso de tasas mínimas de 2 Mbps, es necesario instalar al menos dos puntos de acceso por localización (excepto en el escenario con 10 canales de vídeo).

Para determinar la mejor configuración se siguió el criterio de minimizar la densidad de puntos de acceso (Tabla 1). Para ello se deben comparar las Tablas 1 y 2. Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la mayor parte de los casos la mejor opción es un único punto de acceso con una tasa mínima permitida

Tasa mínima	1 AP	2 APs	3 APs
1 Mbps	$1,10 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$2,20 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$3,30 \cdot 10^{-5} APs/m^2$
2 Mbps	$1,41 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$2,83 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$4,24 \cdot 10^{-5} APs/m^2$
5,5 Mbps	$1,62 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$3,25 \cdot 10^{-5} APs/m^2$	$4,87 \cdot 10^{-5} APs/m^2$

Cuadro 1: Densidad de puntos de acceso

de 5,5 Mbps. Sin embargo, para el caso de 10 canales de vídeo, la solución óptima es un único punto de acceso con una tasa mínima de 2 Mbps. Estos resultados son interesantes por lo siguiente:

1. La planificación de bandas en IEEE 802.11 es más difícil superponiendo varios puntos de acceso en la misma localización.
2. Cuando tengamos 10 canales de vídeo o menos, la interferencia entre canales es más fácil de evitar, puesto que los puntos de acceso estarán separados por mayores distancias.

En todos los casos, la estrategia para disminuir las probabilidades de bloqueo y expulsión es aumentar el número máximo de canales simultáneos. Tanto al eliminar una modulación como al añadir un punto de acceso, se duplica aproximadamente la capacidad. Esto nos podría inducir a pensar que los resultados obtenidos deberían ser similares. Eliminar modulaciones es mejor porque indirectamente reducimos el tráfico en el sistema debido a que se reduce también el área de cobertura del punto de acceso y, como se supone que los usuarios están repartidos de manera uniforme, las peticiones se reducirán también de manera proporcional al área ocupada por la modulación eliminada. Aumentando únicamente el número de puntos de acceso por localización no reduce el número medio de peticiones.

Tasa mínima	1 AP	2 APs	3 APs
1 Mbps			
2 Mbps	10	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40
5,5 Mbps	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40
11 Mbps	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40	10, 20, 30, 40

Cuadro 2: Configuraciones con probabilidades de bloqueo y expulsión prácticamente iguales a 0 (número de canales), $\alpha = 0,6$ y $p \leq 0,8$

4. Publicaciones y proyectos

La actividad investigadora alrededor de este proyecto ha producido varios artículos que han sido publicados en sus respectivas actas de congresos internacionales. Estos artículos se pueden encontrar en los anexos (Anexos I, II, III, IV y V) presentados en este documento.

Finalmente, este proyecto también ha recibido financiación para su desarrollo de tres proyectos de financiación pública, uno de ellos la Red de Excelencia Satnex del VI Programa Marco de la Unión Europea (Anexo VI). En la actualidad, se sigue trabajando en nuevas líneas que tienen como punto de partida los resultados obtenidos en este trabajo y que sirven de base para la solicitud de nuevos proyectos oficiales.

Originalidad

Las partes clave en el desarrollo de este trabajo se basaban en varios aspectos presentados a continuación:

- *Desarrollo de un servicio de televisión para dispositivos móviles:* Si bien todavía no es un servicio popular y su uso no está muy extendido todavía, sí es cierto que existen fuertes previsiones de crecimiento en esta dirección a medio y largo plazo. En el caso de este proyecto, la idea presentada es una idea original puesto que cuando se empezó a trabajar en su desarrollo, todavía no existía ningún servicio de televisión móvil. En cualquier caso, los servicios existentes hoy en día están orientados hacia la telefonía móvil y en particular hacia las redes de tercera generación. A día de hoy no existe ningún servicio que esté orientado hacia redes inalámbricas IEEE 802.11.
- *Superación de los problemas tecnológicos intrínsecos a las redes IEEE 802.11:* Desde el punto de vista de la capa de red son varios los problemas que se presentaban:
 - Limitación del ancho de banda: El ancho de banda era uno de los parámetros a optimizar. Por un lado, tenemos un número de canales determinado y por el otro los usuarios demandando el acceso al servicio. Debido a las limitaciones de la arquitectura, es posible que existan situaciones en las que no se pueda ofrecer el servicio a todos los usuarios. Estas limitaciones implican en la práctica que existirá cierta probabilidad de bloqueo y si se permite la expulsión de usuarios, que exista cierta probabilidad de expulsión. Con el objetivo de dar el mejor servicio posible se diseñó un algoritmo que minimizara al máximo las dos probabilidades y se hizo un análisis mediante simulaciones para determinar cual era la mejor distribución de puntos de acceso que cumpliera unos requisitos mínimos de calidad al menor coste.
 - *Soporte de los cambios de modulación:* IEEE 802.11 se caracteriza por tener la capacidad de usar distintas modulaciones que producen distintas tasas de datos. En la práctica, cuanto más cerca esté un usuario del punto de acceso, mayor será la tasa con la que el punto de acceso pueda transmitir. Esta sencilla cuestión plantea un importante problema puesto que reducir la tasa de transmisión no es igual a reducir el ancho de banda usado. De hecho, en IEEE 802.11, reducir la tasa de transmisión aumenta la ocupación del canal. Pondremos un ejemplo sencillo: un punto de acceso IEEE 802.11b que transmite con una tasa de 11 Mbps un flujo de 1Mbps ocupa la aproximadamente un 10 % parte del canal; sin embargo, si reduce su tasa a 1 Mbps y sigue transmitiendo el flujo a 1 Mbps, ocupará un 100 % y no dejará lugar para más transmisiones en ninguna de las otras modulaciones.

El problema de los cambios de modulación puede suponer un problema si la tasa del vídeo es siempre constante. Por otro lado, si transmitimos en *multicast*, y degradamos la calidad para que el vídeo pueda ser visualizado por los usuarios con menor tasa, estamos perjudicando a los usuarios que se encuentren en lugares más próximos al punto de acceso. Además, también puede ocurrir que no haya usuarios en puntos alejados y, por lo tanto, usar vídeo de baja calidad significaría desaprovechar el ancho de banda disponible.

La decisión que se tomó para optimizar el uso del ancho de banda fue disponer por cada canal de vídeo de un flujo en cada modulación, de tal manera que a tasas más altas mayor calidad se utilizaría para la codificación del vídeo. Con esto se consigue que cada cliente recibe a la mejor calidad posible teniendo en cuenta su localización.

Tanto los resultados de las pruebas con el prototipo como los resultados obtenidos a partir de las simulaciones demostraron que era factible la implementación de un servicio y que era

posible encontrar una configuración para proporcionar el servicio dentro de unos parámetros razonables de funcionamiento.

- *Encontrar una fuente de vídeo digital:* Al principio del proyecto la única fuente de vídeo digital que existía era la que ofrecía el satélite. Este fue el motivo por el que se optó por esta fuente. Hoy en día, tenemos además la televisión digital terrestre, aunque el haberla elegido en lugar del satélite no hubiera cambiado nada en cuanto al desarrollo. Las ventajas del satélite con respecto a otras fuentes es que, por su naturaleza, es un medio *multicast* y es posible recibir señal en cualquier punto sin limitación dentro de la huella.

Finalmente, son tres los aspectos clave en cuanto a la originalidad de este proyecto y que suponen una diferencia con lo que se había hecho anteriormente:

1. Al menos, hasta donde el autor conoce, este proyecto y los artículos que ha generado son la primera propuesta existente para desarrollar un servicio de televisión para dispositivos móviles sobre redes IEEE 802.11.
2. La piedra angular del proyecto: La detección y señalización de los cambios de modulación para que el servidor adapte el ancho de banda del contenido a las capacidades del cliente. Igual que en el punto anterior, este proyecto fue la primera propuesta de un servicio que tuviera en cuenta la posición de los usuarios en una red IEEE 802.11.
3. Desarrollo de un algoritmo de planificación para ofrecer el servicio de televisión para dispositivos en redes IEEE 802.11. Una vez más, hasta donde el autor conoce, se trata de la primera propuesta en esta dirección.

Aplicación práctica

El proyecto presentado tiene varias aplicaciones prácticas. La más obvia es su aplicación directa como servicio. Sin embargo, es posible encontrar aplicaciones en distintos sectores:

- *Servicio de televisión digital para dispositivos móviles a través de redes IEEE 802.11:* Con la salvedad de las aplicaciones interactivas, la aplicación de este proyecto a este campo podría ser de interés. De hecho, en lugares como aeropuertos, centros comerciales y lugares con gran afluencia de gente o donde la gente tenga que esperar durante períodos de tiempo relativamente largos, un servicio de estas características puede resultar de gran atractivo para las operadoras.
- *Servicio de vídeo bajo demanda para dispositivos móviles:* En el proyecto se usaron como fuentes, contenidos de televisión transcodificados en tiempo real. Sin embargo, no existe ninguna limitación que impida que los contenidos puedan ser ofrecidos bajo demanda; excepto las impuestas por las propias limitaciones de la tecnología sobre la que se trabaja. De hecho, el autor del proyecto está trabajando en la actualidad en el desarrollo de arquitecturas que permitan el desarrollo de servicios de vídeo bajo demanda sobre redes inalámbricas. Y es que hay que tener en cuenta que la principal diferencia del vídeo bajo demanda con respecto a los contenidos en directo estriba en que en el segundo caso un único flujo multicast es suficiente para dar servicio a todos los usuarios, mientras que para el vídeo bajo demanda, el comportamiento aleatorio de los usuarios impone unos requisitos de ancho de banda mucho más estrictos que en el caso tratado en este proyecto.
- *Servicio de distribución de vídeo doméstico a través de IEEE 802.11:* Una de las características presente hoy en día en los reproductores de televisión digital es la posibilidad de servir parte de los canales recibidos a través de la red *ethernet*. Si bien para mantener la calidad del vídeo original, las actuales redes IEEE 802.11 no son una solución idónea, con la nueva generación de redes IEEE 802.11n estos problemas serán prácticamente inexistentes.
- *Adaptación a otro tipo de redes:* La arquitectura propuesta no sólo es apta para redes IEEE 802.11 sino que también se puede aplicar a otro tipo de redes en las cuales puedan existir cambios bruscos en las condiciones. Un ejemplo podrían ser redes *Homeplug*, donde la naturaleza ruidosa e impredecible del medio hace muy difícil garantizar unas condiciones de recepción estáticas en el tiempo.

Anexo I

QoS Provisioning in Mobile Video Services with Satellite Sources

En este artículo, se propone un sistema de transcodificación para redes IEEE 802.11. La distribución de contenidos sigue el estándar SAP/SDP.

F. J. González Castaño, R. Asorey Cacheda, M. Vilas Paz, F. Gil Castiñeira, E. Costa Montenegro, R. Pérez García, “QoS Provisioning in Mobile Video Services with Satellite Sources”, *International Workshop of COST Actions 272 and 280. Satellite Communications – From Fade Mitigation to Service Provision*, Noordwijk, Holanda, Mayo 2003.

Anexo II

Real-Time Transcoding and Video Distribution in IEEE 802.11b Multicast Networks

En este artículo, se propone por primera vez un sistema de transcodificación en tiempo real para generar contenidos para redes inalámbricas.

R. Asorey Casheda, F. J. González Castaño, “Real-Time Transcoding and Video Distribution in IEEE 802.11b Multicast Networks”, *Eighth IEEE International Symposium on Computers & Communications (ISCC 2003)*, Kemer Antalya, Turquía, Junio-Julio 2003.

Anexo III

Servicios de Vídeo Móvil sobre IEEE 802.11b

Este artículo se publicó en la revista Díxitos del Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) en el año 2004. En él se presenta el prototipo de transmisión de vídeo realizado en el proyecto WIPv6, coordinado por el CESGA.

R. Asorey Cacheda, F.J. González Castaño, “Servizos de vídeo móbil sobre IEEE 802.11b”, *DÍXITOS*, CESGA, Agosto 2004.

Anexo IV

Position-Aware IEEE 802.11b Mobile Video Services

En este artículo, se presentan los resultados experimentales de un prototipo de servicio de vídeo cuya calidad depende de la posición. La calidad se ajusta mediante la variación de la tasa de vídeo, ajustándola a las capacidades del cliente.

Este trabajo fue presentado junto a una demostración real del prototipo de televisión digital móvil en funcionamiento.

R. Asorey Casheda, F. J. González Castaño, E. Costa Montenegro, I. López Cabido, A. Gómez Tato, J. C. Pérez Gómez, "Position-Aware IEEE 802.11b Mobile Video Services", *Third International Conference on Entertainment Computing*, Amsterdam, Holanda, Septiembre 2004.

Anexo V

On the Feasibility of Mobile Video Services for IEEE 802.11b Multicast Networks

En este artículo, se evalúan las posibilidades de proporcionar servicios de vídeo para redes IEEE 802.11b. Se demuestra por un lado que no es necesario utilizar codificación incremental. Además, dependiendo del número de canales de contenidos *multicast*, es posible cubrir la demanda con probabilidades de bloqueo y expulsión prácticamente nulas aumentando la densidad de puntos de acceso (mediante la colocación de más puntos de acceso por localización o eliminando las modulaciones de transmisión de tasas más bajas).

R. Asorey Cacheda, F. J. González Castaño, J. C. Pérez Gómez, I. López Cabido, A. Gómez Tato ,
“On the Feasibility of Mobile Video Services for IEEE 802.11b Multicast Networks”, *First International Workshop on Mobility Aware Technologies and Applications*, Florianópolis, Brasil, Octubre 2004.

Anexo VI

Financiación de Proyectos

A continuación se citan los proyectos que han financiado parcialmente el trabajado presentado:

- Proyecto: Sistema de desarrollo WLAN (PGIDIT02PXI32201IF):
 - Financiado por: Xunta de Galicia.
 - Entidades: Universidade de Vigo.
 - Período: Desde 06/2002 hasta 01/2004.
 - Responsable: F.J. González Castaño.
 - Investigadores: Grupos de investigación ET-1 y TC-1-UVI.
- Proyecto: Estudio sobre la problemática de la implantación de IPv6 y de tecnologías de calidad de servicio en redes de investigación:
 - Financiado por: Centro de Supercomputación de Galicia - CESGA.
 - Entidades: Universidade de Vigo.
 - Período: Desde 10/02 hasta 10/03.
 - Responsable: F.J. González Castaño.
 - Investigadores: Grupo de investigación TC-1-UVI.
- Proyecto: SatNEx - Satellite Communications Network of Excellence:
 - Financiado por: VI Programa Marco de la Unión Europea.
 - Entidades: DLR, Aristotle University of Thessaloniki, University of Bradford, Budapest University of Technology and Economics, Centre National DEtudes Spatiales (Francia), CNIT (Italia), Fraunhofer University, Groupe des Ecoles des Télécommunications (Francia), Institute of Communications and Computer Systems (Grecia), National Observatory of Athens, CNR (Italia), Jozef Stefan Institute (Eslovenia), Rwth (Alemania), Laboratoire Co-opératif en Télécommunications Spatiales et Aéronautiques (Francia), Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung (Alemania), UCIIM, University of Surrey, University of Aberdeen, Università degli Studi di Bologna, University Tor Vergata of Roma, Universidade de Vigo.
 - Período: 5 años.
 - Responsable: Erich Lutz.
 - Presupuesto: 4,4 millones de euros (2 años).