

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Máster en Postproducción Digital



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de la QoE del usuario final cuando se utiliza el protocolo
MPEG-DASH en el entorno de e-learning “Polimedia””

Tipología: **Trabajo de investigación**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor: **Laura García García**

Tutor: **Jaime Lloret Mauri**

GANDIA, 2016

Resumen

Las plataformas de e-learning como Polimedia, la plataforma de aprendizaje por internet desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia, son empleadas cada vez más por usuarios que se valen de los contenidos de estas plataformas para complementar su formación. Para optimizar el funcionamiento de la plataforma Polimedia, se está valorando el uso de otras técnicas de transmisión como MPEG DASH. En este trabajo se realiza un estudio previo de los conceptos de calidad de experiencia y sus factores de influencia. Se estudia el funcionamiento de MPEG DASH y los estudios que se han llevado a cabo. Se explica el proceso de creación de los MPDs. Se explica cómo crear un servidor multimedia a partir de software libre. Se realizan pruebas en un entorno controlado para determinar el funcionamiento de MPEG DASH en situaciones con poco ancho de banda disponible. Se detectan los factores que pueden amenazar la calidad de experiencia, tras lo cual se realiza un estudio subjetivo para determinar cuánto afecta a la calidad de experiencia percibida por el usuario. Por último, se detallan los factores que los usuarios encuentran más molestos y se realizan unas recomendaciones para el uso óptimo de MPEG DASH en plataformas como Polimedia.

Palabras clave

QoE, multimedia, Polimedia, MPEG DASH, e-learning

Abstract

E-learning platforms such as Polimedia, the learning through internet platform developed by the Universidad Politécnica de Valencia, are being increasingly used by users that employ the contents of these platforms to complement their education. To optimize the performance of the platform Polimedia, the use of other transmission techniques such as MPEG DASH is being assessed. In this dissertation, we perform a previous research of Quality of Experience or QoE concepts and their influence factors. We study how MPEG DASH works and the studies that have been done about it. We explain the MPD's creation process. We explain how to create a multimedia streaming server from open source software. We perform tests in a controlled environment to determine the performance of MPEG DASH in situations with few available bandwidth. We detect the factors that can menace the quality of experience, after that, we perform a subjective study to assess how much that affects the quality of experience perceived by the user. At last, we detail the factors that the users find more bothersome and we give some recommendations to optimize the use of MPEG DASH in platforms like Polimedia.

Keywords

QoE, multimedia, Polimedia, MPEG DASH, e-learning

Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Precedentes del proyecto.....	9
1.4 Estructura del proyecto.....	9
Capítulo 2: Estado del arte.....	11
2.1 QoE.....	11
2.1.1 Factores de influencia de la QoE.....	11
2.1.2 Parámetros de QoS que afectan a la QoE.....	13
2.1.3 Formas de medir la QoE.....	14
2.2 Streaming adaptativo sobre HTTP.....	16
2.2.1 Antecedentes.....	16
2.2.2 Streaming Adaptativo.....	17
2.2.3 MPEG DASH.....	19
2.2.4 Estudios.....	21
Capítulo 3: Proceso de creación de los MPDs.....	24
3.1 Software utilizado.....	24
3.1.1 ffmpeg.....	24
3.1.2 Gpac.....	25
3.2 Instalación y configuración del software.....	25
3.2.1 ffmpeg.....	25
3.2.2 Gpac.....	27
3.3 Creación de los MPDs.....	28
Capítulo 4: Instalación y configuración del servidor multimedia.....	32
4.1 Software utilizado.....	32
4.1.1 Máquina virtual Ubuntu 14.04.2.....	32
4.1.2 MobaXterm.....	32
4.1.3 Paella Player.....	33
4.2 Colocación de los vídeos en el servidor.....	34
Capítulo 5: Pruebas.....	35
5.1 Elección del reproductor.....	35
5.2 Software utilizado.....	36

5.2.1 Wireshark.....	36
5.2.2 Testtool	38
5.3 Pruebas con red cableada en entorno controlado.....	39
5.4 Pruebas con red inalámbrica en entorno controlado	45
5.4.1 Caso con 54 Mbps.....	46
5.4.2 Caso a 11Mbps	50
5.4.3 Caso a 1 y 2 Mbps	54
5.5 Pruebas en entorno real	56
5.6 Estudio subjetivo de la calidad de experiencia	59
5.6.1 Caso 1: Tamaño de segmento de 1 a 9 segundos	61
5.6.2 Caso 2: Tamaño de segmento de 10 a 19 segundos.....	61
5.6.3 Caso 3: Tamaño de segmento de 20 a 29 segundos.....	62
5.6.4 Caso 4: Tamaño de segmento de 30 segundos	63
5.7 Aspectos molestos para el usuario y recomendaciones.....	64
Capítulo 6: Conclusiones	70
6.1 Cumplimiento del objetivo	70
6.2 Conclusiones sobre el trabajo	70
6.3 Problemas encontrados y cómo se han solucionado	71
6.4 Aportaciones personales	72
6.5 Futuras líneas de trabajo	72
Referencias.....	73

Índice de tablas

Tabla 1: Factores de influencia que afectan a la QoE[3]	11
Tabla 2: Efectos de las medidas según el tipo de servicio [5]	16
Tabla 3: Características del vídeo de referencia	28
Tabla 4: Características de los vídeos resultantes	29
Tabla 5: Duraciones de los segmentos de los MPDs	31
Tabla 6: Perfil de los evaluadores	60
Tabla 7: ANOVA de los resultados de las pruebas subjetivas	63
Tabla 8: Media de los resultados de las pruebas subjetivas.....	64
Tabla 9: Diferencia entre cada caso.....	64

Índice de figuras

Figura 1: Modelo jerárquico del Media Presentation Description	20
Figura 2: Diagrama de bloques del proceso de creación de un MPD	24
Figura 3: Versiones disponibles de software ffmpeg.....	26
Figura 4: Configuración ffmpeg 1	26
Figura 5: Configuración de ffmpeg 2.....	27
Figura 6: Proceso de instalación de Gpac pasos 1 y 2.....	27
Figura 7: Proceso de instalación Gpac pasos 3 y 4	28
Figura 8: Proceso de instalación Gpac paso 5	28
Figura 9: Ejemplo de MPD	30
Figura 10: Diagrama de bloques del proceso de creación del servidor	32
Figura 11: Configuración de MobaXterm	33
Figura 12: Ejemplo de fichero data.json	34
Figura 13: Inicio del vídeo de Polimedia empleado.....	35
Figura 14: Aspecto del reproductor MP4Client/OSMO4	36
Figura 15: Pantalla inicial de Wireshark.....	37
Figura 16: Obtención de ancho de banda en Wireshark.....	37
Figura 17: Gráfico de Wireshark de los paquetes capturados	38
Figura 18: Modo servidor de Testool	39
Figura 19: Modo cliente de Testool	39
Figura 20: Topología de la red cableada	40
Figura 21: Tiempo de estabilidad de la red cableada	41
Figura 22: Número de saltos de calidad en red cableada	41
Figura 23: Calidad máxima que se alcanza en red cableada	42
Figura 24: Ancho de banda con 0 usuarios	43
Figura 25: Ancho de banda con 2 usuarios	43
Figura 26: Ancho de banda con 4 usuarios	44
Figura 27: Ancho de banda con 5 usuarios	44
Figura 28: Ancho de banda con 6 usuarios para 2, 4 y 6 segundos de tamaño de segmento	45
Figura 29: Ancho de banda con 6 usuarios y tamaño de segmento de 8, 10, 20 y 30 segundos	45
Figura 30: Topología de la red inalámbrica	46
Figura 31: Tiempo de estabilidad para 54 Mbps	47
Figura 32: Número de saltos de calidad en red inalámbrica a 54 Mbps.....	47
Figura 33: Máxima calidad alcanzada en red inalámbrica a 54 Mbps	48
Figura 34: Ancho de banda con 0 usuarios para la red inalámbrica a 54 Mbps.....	48
Figura 35: Ancho de banda con 2 usuarios en red inalámbrica de 54 Mbps	49
Figura 36: Ancho de banda con 4 usuarios en red inalámbrica a 54 Mbps.....	49
Figura 37: Ancho de banda con 6 usuarios en red inalámbrica a 54 Mbps.....	50
Figura 38: Tiempo de estabilidad en red inalámbrica a 11 Mbps.....	50
Figura 39: Número de cambios de calidad en red inalámbrica a 11 Mbps	51
Figura 40: Máxima calidad alcanzada en red inalámbrica a 11 Mbps	51
Figura 41: Ancho de banda con 0 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps.....	52
Figura 42: Ancho de banda con 2 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps.....	52

Figura 43: Ancho de banda con 4 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps.....	53
Figura 44: Error de flash negro	53
Figura 45: Ancho de banda con 6 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps.....	53
Figura 46: Tiempo de estabilidad en red inalámbrica a 1 y 2Mbps	54
Figura 47: Ancho de banda en red inalámbrica a 2 Mbps para 0, 2 y 4 usuarios	55
Figura 48: Ancho de banda en red inalámbrica a 1 Mbps con 0, 2 y 4 usuarios	55
Figura 49: Error en el vídeo	56
Figura 50: Tiempo de cambio de calidad	57
Figura 51: Ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento entre 2 y 8 segundos	57
Figura 52: ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento de 10 y 15 segundos	58
Figura 53: Ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento de 20 y 25 segundos	58
Figura 54: Ancho de banda empleado por el vídeo con tamaño de segmento de 30 segundos	59
Figura 55: Formulario de evaluación de calidad de experiencia	60
Figura 56: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 1 a 9 segundos	61
Figura 57: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 10 a 19 segundos	62
Figura 58: Evaluación subjetiva de los tamaños de segmento de 20 a 29 segundos	62
Figura 59: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 30 segundos.....	63
Figura 60: Valoración media de la calidad de experiencia	64
Figura 61: Efecto de los cambios de calidad en el vídeo de prueba	65
Figura 62: Diferencia en la legibilidad de las letras según la calidad	66
Figura 63: Efecto de la calidad en el tamaño de las fuentes	67
Figura 64: Efecto del cambio de calidad en la explicación de un programa	68
Figura 65: Efecto del cambio de calidad con el empleo de páginas web.....	68
Figura 66: Efecto del cambio de calidad con el empleo de gráficas	68
Figura 67: Efecto de la pérdida de calidad en dibujos	69

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

Actualmente se demanda cada vez más una mayor calidad de los vídeos en streaming. A su vez, el tráfico de datos de vídeo y audio se está incrementando debido a los cambios en el comportamiento de las personas, que actualmente optan de forma más habitual por la visualización de los contenidos audiovisuales a través de internet. A partir de esta demanda han surgido plataformas de visualización de contenido audiovisual como Netflix [1] o Yomvi [2]. Junto a esto, el gran número de dispositivos que solicitan estos vídeos, en los que se incluyen PCs, tablets, smartphones o smart TVs, crea la necesidad de optimizar el ancho de banda de la red.

Para optimizar el ancho de banda se están siguiendo distintas estrategias [3] como la creación de algoritmos de estimación de ancho de banda, la mejora de la infraestructura real de la red, la creación de algoritmos para escoger la codificación adecuada, como el de Andrés López-Herreros y otros [4], y el desarrollo de estándares de streaming adaptativos que contribuyen a mejorar el ancho de banda seleccionando automáticamente la calidad del vídeo según el estado de la red, entre otros.

Uno de estos estándares adaptativos es MPEG DASH, que se corresponde con Streaming Dinámico Adaptativo sobre HTTP. MPEG DASH es de amplio interés para la plataforma de e-learning de la Universidad Politécnica de Valencia, cuyo nombre es Polimedia. Ésta plataforma se utiliza como complemento de las clases impartidas en el aula y requiere una buena calidad de experiencia para facilitar el aprendizaje del alumno.

La necesidad de que los usuarios de esta plataforma obtengan un buen servicio, que les permita disponer de contenidos de gran calidad complementarios a su educación, ha llevado al desarrollo de este trabajo fin de máster. En este TFM se comprobará la satisfacción del usuario final con los contenidos de Polimedia en caso de que empleasen MPEG DASH. Para ello se ha realizado un estudio preliminar y se ha buscado la causa que podría reducir de forma mayor la calidad de experiencia que experimenta el usuario final para proceder a realizar una evaluación subjetiva y así, cuantificar la repercusión real de esta causa y su posible solución y, de esta forma poder mejorar la calidad de experiencia de los usuarios de Polimedia.. El TFM se ha realizado en el Área de Sistemas de la Información y las Comunicaciones (ASIC) de la Universidad Politécnica de Valencia.

1.2 Objetivos

Los objetivos que se han marcado en este proyecto son:

- Detectar cuáles son las características más adecuadas para transmitir un contenido multimedia con la mejor QoE posible.

- Encontrar los aspectos de QoE que resultan más molestos al usuario cuando visualiza videos desde Polimedia.
- Aplicar los resultados obtenidos para evaluar las áreas en las que el desempeño del protocolo MPEG DASH puede mejorar.

1.3 Precedentes del proyecto

Aunque no existen otras tesinas que estudien la calidad de experiencia de MPEG DASH aplicada a la plataforma de aprendizaje Polimedia, existen tres tesinas que se adentran en el estudio de la calidad de experiencia.

En 2009 se presentó la tesina "Estudio de parámetros de IPTV para mejorar el QoE de usuario" realizada por Marcelo Emilio Atenas Arzua en el Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia, donde crea un algoritmo de gestión de red para aportar una buena QoE a los usuarios de IPTV, valiéndose de las mediciones de la red.

En 2013 se presentó la tesina "Diseño y Desarrollo de un Sistema de Gestión Inteligente integrado de servicios de IPTV estándar, estereoscópico y HD basado en QoE" realizada por Alejandro Cánovas Solbes en el Grado de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia, donde utiliza los parámetros de QoE para plantear un sistema de gestión inteligente.

Por último, en 2014 se presentó la tesina "Estudio de la variación de QoE en Televisión IP cuando varían los parámetros de QoS" realizada por Jose Miguel Jiménez Herranz en el Máster en Postproducción Digital de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia donde plantea un sistema que incluye un protocolo de comunicación y un algoritmo de funcionamiento para mejorar la calidad de experiencia de los usuarios de IPTV.

1.4 Estructura del proyecto

La estructura del proyecto es la que se describe a continuación:

El segundo capítulo plantea el estado del arte de este trabajo. Se define el concepto de calidad de experiencia y se detallan sus factores de influencia. Se describen las formas de medir la QoE. Se realiza un estudio sobre la evolución del streaming. Se detalla el funcionamiento de MPEG DASH. Por último, se describen algunos de los estudios que se han realizado sobre MPEG DASH en los últimos años.

En el tercer capítulo se detalla el proceso de creación de los MPDs. Para ello, se explica primero el software empleado, así como su instalación y configuración y se muestran los comandos empleados para la codificación de los vídeos y la creación de los MPDs, explicando la función de cada una de las opciones.

En el cuarto capítulo se detalla el proceso de creación del servidor de streaming multimedia, indicando el software empleado, su configuración y la forma de subir los archivos para que funcione correctamente con MPEG DASH.

En el quinto capítulo se realizan un conjunto de pruebas en un entorno controlado. Se determinan los factores que pueden mermar la calidad de experiencia de MPEG DASH, se comprueba el comportamiento de MPEG DASH según la variación del tamaño de segmento y se realiza un estudio subjetivo de la calidad de experiencia. Finalmente, se exponen los factores que resultan, más molestos para los usuarios y se realizan unas recomendaciones para utilizar MPEG DASH de la forma más óptima posible.

En el sexto y último capítulo, se muestra la consecución de objetivos, las conclusiones, los problemas que han surgido a lo largo de la realización del proyecto, las aportaciones y las futuras líneas de trabajo.

Capítulo 2: Estado del arte

2.1 QoE

Existen diferentes definiciones del concepto de calidad de experiencia. A continuación se muestran algunas de ellas.

Según la ITU-T [5] la QoE se define como “la aceptación general de una aplicación o servicio, tal cual lo percibe de forma subjetiva el usuario final”. A esta definición se le añaden dos connotaciones:

1. “La calidad de experiencia incluye los efectos del sistema end-to-end completo (cliente, terminal, red, infraestructura, etc)”
2. “La aceptación total puede estar influenciada por el contexto y las expectativas del usuario”

Qualinet [6] la define como “el grado de deleite o irritación del usuario de una aplicación o servicio. Es resultante del cumplimiento de sus expectativas con respecto a la utilidad y/o al disfrute de la aplicación o servicio a la luz de la personalidad del usuario o su estado actual”.

2.1.1 Factores de influencia de la QoE

Los factores de influencia [7] se definen como “cualquier característica de un usuario, sistema, servicio, aplicación o contexto cuyo estado actual puede tener influencia en la calidad de experiencia” [6]. Hay que tener en cuenta que factores de influencia específicos pueden afectar a distintos servicios o aplicaciones. En la tabla 1 aparecen algunos de los factores que pueden influir en la Calidad de Experiencia.

Rendimiento	Calidad de la red	Compatibilidad	Disfrute	Género
Accesibilidad	Efectividad del contenido	Edad	Atractivo	Personalidad
Confiabilidad	Eficiencia del dispositivo	Movilidad	Seguridad	Expectativas anteriores
Pérdida de paquetes	Eficacia del dispositivo	Contexto medioambiental	Fidelidad	Motivación
Latencia	Contexto cultural	Independencia	Emociones	Interacción
Jitter	Contexto tecnológico	Competencia	Expectaciones	Interfaz
Disponibilidad del servidor	Coste	Contexto personal/social	Aplicación	Marca

Tabla 1: Factores de influencia que afectan a la QoE[7]

La comunidad Qualinet ha hecho una clasificación de los factores de influencia, mientras que en [8], Ina Weschung y otros se adentran en el estudio detallado de los factores de influencia.

2.1.1.1 Factores de influencia humanos

Se corresponden con “cualquier propiedad o característica de un usuario humano”. Estas características pueden ser invariables como la edad, el género o la lengua madre, mientras que otras están sujetas a cambios como la situación demográfica o socioeconómica, o la condición física y mental del usuario. Incluso hay características que pueden variar de interacción a interacción como la motivación o el estado emocional del usuario. Debido a la amplia variedad de factores de influencia humanos y la velocidad con la que pueden cambiar estos factores para un usuario en concreto, no se puede diseñar un sistema específico para cada usuario. En su lugar se divide a los usuarios en grupos según la cuestión que se vaya a evaluar. Esta clasificación se puede hacer en función de las siguientes características:

- Características de percepción: Discapacidades visuales o auditivas, típico de usuarios de la tercera edad.
- Características de comportamiento: Usuarios diestros o zurdos, habla con o sin acento.
- Experiencia: Experiencia con el sistema bajo investigación, con sistemas similares, con la tarea a desempeñar, con la tecnología en general.
- Motivación: Motivación para usar el sistema.
- Preferencias individuales, habilidades o conocimiento.

Las características descritas anteriormente influyen tanto en la interacción del usuario con el sistema, como en la forma en la que se percibe la calidad de experiencia.

2.1.1.2 Factores de influencia del sistema

Son las “propiedades o características que determinan la calidad técnica de una aplicación o servicio”. Estas propiedades tienen relación con la grabación del contenido multimedia, la codificación, transmisión, almacenamiento, rendering, la reproducción y las funcionalidades interactivas de la aplicación o servicio. El ancho de banda, delay, jitter, pérdida de paquetes, seguridad o resolución son un ejemplo de este tipo de factores de influencia.

2.1.1.3 Factores de influencia del contexto

Los factores de influencia del contexto se definen como “factores que se valen de cualquier propiedad situacional para describir el entorno del usuario en términos de características físicas, temporales, sociales, económicas o técnicas”. Este tipo de factores puede dividirse a su vez en factores de entorno y factores de servicio.

En los factores de entorno se tiene en cuenta el uso físico del entorno en el que se encuentra el usuario. Tanto el uso en el hogar o la oficina como los canales de

transmisión implicados en la interacción. También están incluidas las condiciones de espacio, acústicas y de iluminación que influyen en el comportamiento del usuario. En el uso del entorno también se tiene en cuenta las actividades que puede realizar el usuario a la vez que está utilizando la aplicación o el servicio, y que se han de tener en cuenta a la hora de evaluar el sistema puesto que puede mermar las capacidades cognitivas que el usuario dedica a la interacción con el sistema durante la evaluación de la calidad de experiencia.

Los factores de servicio son características no físicas del sistema que pueden influenciar la forma en la que el usuario percibe la calidad. Estos factores son eventos que surgen como resultado de la interacción de usuario con el sistema como restricciones de acceso, disponibilidad del sistema, o cualquier evento de seguridad o privacidad.

2.1.1.4 Aspectos de la interacción del usuario

Ina Wechsung y otros [8] también estudian cómo afecta a la calidad de experiencia la interacción que el usuario tiene con la aplicación. Afirman que estos parámetros pueden no estar directamente relacionados con la calidad percibida pero su interpretación es útil para los desarrolladores del sistema.

Se puede medir el desempeño de la interacción por el esfuerzo requerido por el usuario para interactuar con el sistema, así como la libertad de interacción. Los aspectos que se incluyen son:

- Esfuerzo percibido: Esfuerzo requerido para entender e interpretar los mensajes que emite el sistema.
- Carga cognitiva: Costes cognitivos necesarios para realizar una tarea. Por ejemplo, la capacidad necesaria para procesar la información.
- Esfuerzo físico: Esfuerzo físico requerido para comunicarse con el sistema.

2.1.2 Parámetros de QoS que afectan a la QoE

En [9], R. Serral-Graciá y otros identifican los parámetros de QoS de las redes IP que afectan a la QoE de los usuarios:

- Retardo: Cantidad de tiempo que transcurre desde que se genera el paquete, hasta que se recibe en el destino. Puede variar de unos milisegundos a minutos en función del escenario: Real Time Interactive, video bajo demanda o Peer to Peer TV (P2PTV).
- Pérdida de paquetes: Se produce cuando un paquete no alcanza su destino. Puede ser causado por el vaciamiento del buffer o por las condiciones de la red.
- Jitter: Es la variación de delay entre paquetes consecutivos. Puede causar vaciamientos del buffer y, por tanto, pérdida de paquetes.
- Ancho de banda: Es la capacidad de la red para transmitir datos. Cuanto mayor sea el número de usuarios conectados a la red que estén solicitando información, menor será el ancho de banda disponible.

2.1.3 Formas de medir la QoE

La calidad de experiencia es una medida subjetiva y, por tanto, hay diversos métodos de medirla a partir de las respuestas de los usuarios. Sin embargo, también se han realizado estudios que relacionan la QoS con la QoE para poder realizar estas medidas de forma objetiva. A su vez, en [9] R. Serral-Graciá y otros clasifican las formas de medir la QoE en medidas directas y medidas indirectas.

2.1.3.1 Medición subjetiva de la QoE

Las medidas subjetivas de QoE están basadas en experimentos psicoacústicos y visuales. Realizar estos experimentos tiene un gran coste y resulta complejo de hacer. El resultado más común de estos experimentos son valoraciones de calidad obtenidos durante el servicio o después de éste. Tras esto se realiza la media de los resultados para obtener el MOS o Mean Opinion Score. La forma de realizar estas medidas está especificada en la recomendación P.800.1 de la ITU-T [10].

A pesar de ser el método más utilizado para valorar la QoE de forma subjetiva, empleando el MOS se ignoran muchos factores importantes como la respuesta a la aplicación o el nivel de interactividad, que también influyen en la QoE del usuario.

La recolección de los datos puede efectuarse en un entorno de laboratorio o en un entorno real. Para obtener un gran número de medidas en entornos reales, se están empleando métodos de crowdsourcing.

Las medidas subjetivas [11] usadas por la ITU-R Rec. BT.500-11 [12] y la ITU-T Rec.P.910 [13] son:

- Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS): El vídeo de referencia y el vídeo que se va a evaluar son mostrados al evaluador dos veces cada uno de forma alternada. Al terminar la visualización, los evaluadores califican el vídeo empleando una escala del 0 al 100, siendo el 0 la peor calidad y el 100 la máxima. A los evaluadores no se les comunica cuál es el vídeo de referencia y cuál el modificado.
- Double Stimulus Impairment Scale (DSIS): En este método, los evaluadores saben cuál es el vídeo de referencia y cuál es el vídeo a evaluar. Estos vídeos sólo se muestran una vez, comenzando por el de referencia. La escala que se emplea varía del 1 al 5, siendo el 1 la calificación de “muy molesto”, y 5 la de “imperceptible”.
- Single Stimulus Continuous Quality Evaluation (SSCQE): En este método sólo se les muestra a los evaluadores el vídeo procesado. Éste suele tener una duración larga y los evaluadores lo califican de forma instantánea mediante una barra con el rango de “malo” a “excelente”.
- Absolute Category Rating (ACR): Sólo se muestra el vídeo procesado y los evaluadores lo califican mediante una escala de 5 niveles que varían de “malo” a “excelente”.

- Pair Comparison (CP): En este método se muestran fragmentos de la misma escena pero con condiciones variables, combinados de todas las formas posibles.

2.1.3.2 Medición objetiva de la QoE

Las medidas objetivas de QoE son formas de estimar el resultado subjetivo, que se obtendría al realizar los experimentos con los usuarios, basándose únicamente en medidas objetivas de calidad de la red. Debido al gran coste que supone realizar medidas subjetivas se han desarrollado diferentes métodos para estimar la QoE de forma objetiva, cada uno aplicable a unas condiciones específicas. Los cinco tipos de modelos de estimación de QoE son:

- Modelo de capa multimedia: Estiman la QoE del audio o vídeo empleando las señales multimedia como entrada. En función de la forma de empleo de la señal de entrada se puede distinguir entre:
 - Modelo sin referencia.
 - Modelo con referencia reducida.
 - Modelo con referencia completa.
- Modelo de capa de paquete: Emplean únicamente la información procedente de las cabeceras de los paquetes.
- Modelo de capa de flujo de bits: Combina los dos modelos anteriores al emplear la información del flujo de bits y de las cabeceras de los paquetes.
- Modelo híbrido: Es una combinación de los tres modelos mencionados anteriormente.
- Modelo de planificación: No obtienen la información de un servicio existente, en su lugar realiza una estimación de esta información basándose en la información de servicio disponible en la fase de planificación.

2.1.3.3 Medidas directas

- Peak Signal to Noise Ratio (PSNR, Relación señal a ruido): Es una medida que evalúa la diferencia entre dos imágenes. Calcula el error cuadrático medio de cada pixel entre las imágenes originales y las recibidas. A mayor PSNR, mayor similitud. Esta medida se expresa en dBs.
- Structural Similarity (SSIM, Similitud estructural): SSIM combina luminancia, contraste, y la similitud estructural de las imágenes para comparar la correlación entre la imagen original y la recibida.
- Video Quality Metric (VQM, Métrica de calidad de vídeo): Detecta artefactos perceptibles por el ojo humano en las imágenes. Tiene en cuenta el desenfoque, el ruido y las distorsiones de bloque y de color.
- Mean Opinion Score (MOS, Puntuación de opinión media): Fue pensada originalmente para flujos de audio. Combina delays, jitter, el códec empleado y la pérdida de paquetes.

Todas las formas de medida anteriores tienen en común que necesitan los frames del vídeo original para poder comparar y obtener el resultado de calidad de experiencia.

2.1.3.4 Medidas indirectas

Las medidas indirectas tienen en cuenta propiedades que afectan a la experiencia multimedia, pero que no están directamente relacionadas con la calidad del contenido multimedia. Las medidas indirectas están relacionadas con el tipo de servicio de transporte y, en general, requieren acceso a información de la aplicación al depender de acciones de los usuarios, como pausar el vídeo. Algunas de estas medidas son:

- **Delay inicial:** Es el intervalo de tiempo entre que el usuario solicita un contenido y lo recibe. Por ejemplo, el tiempo que transcurre desde que el usuario pincha un enlace de un vídeo, hasta que comienza su reproducción.
- **Tiempo de respuesta:** Es el intervalo de tiempo entre que el usuario lleva a cabo una acción y el sistema la reconoce y contesta al usuario, por ejemplo, cuando el usuario presiona el botón de pausa.
- **Sincronización del envío:** El contenido debe llegar al mismo tiempo a todos los usuarios que estén utilizando un servicio, especialmente importante en los videojuegos online o en las retransmisiones deportivas.
- **Actualización:** Es el intervalo de tiempo que transcurre desde que se genera el contenido hasta que éste es recibido por el usuario. Tiene gran importancia en retransmisiones en directo.
- **Blocking o stalls:** Es una medida relacionada con las métricas directas porque mide cuánto se para el vídeo, lo cual está causado generalmente por buffers vacíos en el receptor.

R. Serral-Graciá y otros [9] también han determinado cómo afecta las medidas anteriores a los diferentes modelos de servicio. Como se aprecia en la tabla 2, cada medida afecta a cada tipo de servicio de forma diferente. El vídeo bajo demanda es el más tolerante de los tres, mientras que el contenido en directo e interactivo depende mucho de los parámetros citados anteriormente.

Medida	Real Time Interactive	Video bajo Demanda	Retransmisión en Directo
Medidas directas	Alto	Medio	Alto
Delay inicial	Alto	Medio	Alto
Tiempo de respuesta	Alto	Medio	Bajo
Sincronización del envío	Alto	Bajo	Alto
Actualización	Alto	Bajo	Alto
Blocking	Alto	Alto	Alto

Tabla 2: Efectos de las medidas según el tipo de servicio [5]

2.2 Streaming adaptativo sobre HTTP

2.2.1 Antecedentes

Según ha pasado el tiempo, internet ha ido evolucionando y, junto a él, el streaming de contenido multimedia. A lo largo de la historia de la transmisión de contenido multimedia por internet, se pueden distinguir tres tipos: el streaming tradicional[14], la descarga progresiva [15] y el streaming adaptativo.

En el streaming tradicional, se emplea un servidor multimedia para transmitir el contenido. Un ejemplo de los protocolos de transmisión multimedia que se emplean en el streaming tradicional son RTSP (Real Time Streaming protocol), RTMP (Real Time Messaging Protocol) y RDT(Real Data protocol). RTSP, por ejemplo, es un protocolo de estado, por lo que es necesario mantener el estado de la conexión hasta que el cliente se desconecte. Para transmitir los paquetes se emplea UDP o TCP, lo que puede causar problemas con los proxies o firewalls, en caso de UDP, o problemas de retardos, en caso de utilizar TCP. En este tipo de streaming se establece un tamaño de buffer en el cliente que no varía, por lo que el servidor transmitirá solo el contenido necesario para llenar el buffer y no se perderá ancho de banda. Por último, el bitrate al que se codifica el vídeo es la tasa a la que el servidor enviará los paquetes, sin posibilidad de cambiarlo.

En la descarga progresiva, el contenido se introduce en un servidor web normal, el cual sirve páginas http, y el cliente necesita saber la URL del archivo multimedia para poder descargarlo. Cuando comenzó esta tecnología, era posible reproducir el archivo multimedia una vez se había completado la descarga. Pero esta tecnología ha evolucionado y, actualmente, es posible comenzar a reproducir el archivo antes de que la descarga haya finalizado.

El inconveniente de la descarga progresiva es el alto consumo de ancho de banda. Si en el buffer hay cincuenta minutos de contenido descargado y se deja de visualizar el contenido a los cinco minutos de comenzar a verlo, se ha perdido el equivalente a esos cuarenta y cinco minutos en ancho de banda. En este tipo de descarga no se puede cambiar la calidad de video una vez se ha comenzado a transmitir, por lo que si las condiciones de red bajan, el vídeo no se adaptará a ellas y continuará la descarga en la calidad que se había seleccionado, independientemente del tiempo necesario para completarla. Es por esta razón por la que surgió el streaming adaptativo, en el cual se centra este estudio.

2.2.2 Streaming Adaptativo

El streaming adaptativo [16] presenta las siguientes características. Se crean copias de distintas de un mismo archivo a distintas calidades para poder transmitir la que más se adecúe a las condiciones de la red. La calidad del archivo transmitido va cambiando para adaptarse a los cambios que se produzcan en la red. Todo esto ocurre de forma automática, sin que el usuario tenga que hacer nada.

Todos los estándares de streaming adaptativo operan de forma parecida, pero existen algunas diferencias entre ellos. Las tecnologías de streaming adaptativo existentes hasta la fecha son:

Adobe HTTP Dynamic Streaming

Adobe HTTP Dynamic Streaming [17][18] es un estándar de transmisión adaptativa que permite la distribución de vídeos en directo y bajo demanda a velocidades de bits adaptables. Está basado en los estándares de MP4 Parte 14 y Parte 12, y transmite mediante conexiones HTTP. Transmite vídeo de alta calidad en los formatos H.264 o VP6 y se pueden reproducir en los reproductores Adobe Flash Player 10.1 y Adobe AIR 2.

HDS ofrece un servicio de monitorización de QoS además de otras funcionalidades comunes a estándares similares. Principalmente se emplea el protocolo TCP para la transmisión, posible con formatos que permiten las interacciones entre el servidor multimedia y el reproductor.

HDS permite la transmisión a diferentes bitrates monitorizando la disponibilidad de ancho de banda extremo a extremo y los ciclos de CPU que el reproductor tiene disponibles. También permite la transmisión de archivos de video de gran tamaño sin la necesidad de descargar el contenido por completo. La tecnología HDS está basada en la fragmentación, en la cual se divide el contenido en pequeños paquetes para, después, proceder a su transmisión. Permite la fragmentación en segmentos de dos o tres segundos, pero la recomendación es de diez segundos. HDS puede implementarse en servidores Apache.

Apple HTTP Live Streaming

Apple HTTP Live Streaming [19][20] es un estándar de transmisión de video sobre HTTP para su reproducción en dispositivos iOS, incluyendo iPhones, iPads, iPods touch y Apple TV, además de los ordenadores MAC OS X. Soporta tanto vídeo en directo como contenido bajo demanda. También soporta la transmisión de múltiples flujos a bitrates diferentes, permitiendo al cliente cambiar de flujo en función de los cambios de ancho de banda disponible. HLS permite la protección del contenido mediante encriptación y autenticación sobre HTTPS de los usuarios.

En HLS se emplea un fichero llamado “Manifiesto” con extensión “.m3u8” con la información de los flujos y los bitrates disponibles. El contenido debe estar dividido en segmentos, cuya extensión es “.ts”. El software que hace las funciones de cliente es parte de los sistemas operativos iOS 3.0+ en caso de dispositivos Apple y Safari 4.0+ para los navegadores web.

En las transmisiones en directo, el servidor codifica el vídeo que recibe en H.264 y el audio en AAC usando el Media Encoder. La salida es un MPEG-2 Transport Stream. Un segmentador de flujo fragmenta el vídeo y el manifiesto generado se coloca en un servidor web. Este manifiesto se va actualizando periódicamente cada vez que se genera un segmento.

Microsoft Smooth Streaming

Smooth Streaming de Microsoft [21][22], también conocido como “Silverlight”, es un estándar de transmisión multimedia sobre HTTP. Al igual que en las soluciones de streaming adaptativo sobre HTTP vistas anteriormente, en Smooth Streaming se segmenta el video en fragmentos, en este caso de dos segundos, que se unen al ser recibidos por el cliente. Los segmentos se transmiten a varios bitrates. Al principio, se

envían los segmentos de menor bitrate y, dependiendo del ancho de banda del cliente y los ciclos de procesador, se aumenta el bitrate hasta alcanzar el bitrate óptimo.

Smooth Streaming emplea contenedores MP4 y el códec de vídeo H.264, debido a su popularidad. Se emplean dos formatos distintos: Disk File Format, un fichero codificado, y Wired Format, que define la estructura de los fragmentos. Por lo tanto, por cada Disk File Format se corresponden varios Wired Formats.

Los ficheros mp4 que contienen el vídeo y el audio presentan la extensión .ismv si contienen sólo vídeo o audio y vídeo, y .isma si contienen audio únicamente. El manifiesto del servidor con la información de los bitrates tiene la extensión .ism. Por último, el manifiesto del cliente donde se especifican los flujos disponibles, presenta la extensión .ismc.

2.2.3 MPEG DASH

MPEG DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) es un estándar de streaming adaptativo de contenido multimedia sobre HTTP elaborado por MPEG(Moving Picture Expert Group). Está relacionado con otras tecnologías de streaming adaptativo sobre HTTP desarrolladas por empresas privadas tales como Adobe HDS, Apple HLS o Microsoft Smooth Streaming.

EL cliente solicita el contenido al servidor web mediante el protocolo HTTP. El servidor proporciona al cliente la información sobre los segmentos de vídeo de distintas calidades disponibles en un documento XML.

El estándar ISO/IEC 23009 [23] define ante todo dos formatos:

- El Media Presentation Description (MPD): Documento en el cual se especifican los formatos de los segmentos.
- Segmentos: Contenido de vídeo dividido en tiempo para su correcto transporte.

En [24] se describen las ventajas de este estándar:

- MPEG-DASH es un estándar que funciona independientemente del códec, por lo que puede emplear contenido multimedia en H.264, WebM y MPEG2TS. Esto significa que se puede usar para contenido codificado según las especificaciones de Adobe HDS, Apple HLS o Microsoft Smooth Streaming.
- MPEG-DASH soporta DRM o Gestión Digital de Derechos. El contenido puede ser encriptado y enviado al cliente empleando diferentes métodos de DRM. En el MPD se pueden especificar los métodos de DRM soportados.
- El MPD permite disponer de audio en múltiples idiomas, seleccionar entre diversos vídeos tomados desde ángulos distintos, elegir visualizar los subtítulos en cualquiera de los idiomas que se proveen o cambiar la calidad del vídeo.
- MPEG-DASH permite emplear segmentos de duración variable, lo cual es de gran utilidad en retransmisiones en directo, donde la duración del próximo segmento se puede especificar al enviar el segmento actual.
- En MPEG-DASH, el mismo contenido puede estar disponible en distintas URLs, por lo que se pueden almacenar en varios servidores o procedes de diversas

fuentes. La ventaja es que el usuario final puede realizar el streaming de cualquiera de ellos para obtener un mayor rendimiento.

A mitad del 2011, las especificaciones de MPEG-DASH se detuvieron y, por tanto, lo comentado anteriormente es el ámbito que abarcan las especificaciones de MPEG-DASH.

Media Presentation Description

La Media Presentation Description está compuesta por las distintas versiones del contenido multimedia junto con su descripción.

El contenido multimedia está dividido por uno o varios periodos de tiempo, que pueden ser independientes o pertenecer al mismo programa o contenido multimedia. Así, un programa de televisión puede estar dividido en múltiples periodos con periodos de anuncios intercalados entre ellos. Cada periodo se compone de uno o varios componentes de contenido multimedia, que varían entre componentes de audio en diversos idiomas, componentes de vídeo proporcionando distintas vistas del mismo programa como en contenido grabado en multicámara, o subtítulos en distintos idiomas. A su vez, estos contenidos tienen asignado un “tipo de contenido multimedia”, como puede ser el audio o el vídeo.

Cada componente puede tener distintas versiones codificadas que heredan las propiedades del contenido multimedia, así como del periodo en el que se encuentra y el componente de contenido multimedia. A su vez se le asignan las propiedades de decodificación del contenido como el sub-sampling, los parámetros de los códecs o el bitrate. El conjunto de estos parámetros son importantes para la selección de los componentes más adecuados.

El Media Presentation Description está implementado en un modelo jerárquico tal como se muestra en la figura 1.

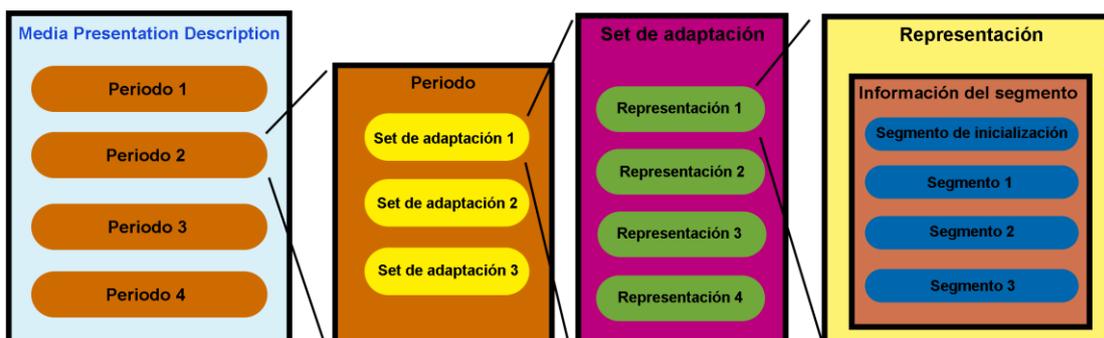


Figura 1: Modelo jerárquico del Media Presentation Description

El Media Presentation Description se divide en:

- **Periodos:** Periodo de tiempo con diversas versiones codificadas del contenido multimedia. El bitrate, idioma, los subtítulos, así como otros parámetros del contenido no cambian durante la duración del periodo.

- **Sets de Adaptación:** Conjunto de las versiones codificadas del contenido multimedia. Cada componente de un tipo de contenido multimedia distinto, puede tener un Set de Adaptación distinto. Si el contenido está multiplexado, las diferentes versiones codificadas del múltiplex conformarán un único Set de Adaptación.
- **Representaciones:** Es una versión codificada de uno o varios componentes de contenido multimedia. Las distintas representaciones Presentan el mismo contenido, difiriendo únicamente en la codificación, por lo que se puede ir cambiando de Representación para adaptarse a las condiciones de la red. Las tecnologías no soportadas por el cliente DASH deben ser ignoradas.
- **Segmentos:** Es el contenido dividido en tiempo para su correcto transporte. Cada segmento tiene una URL asociada y, por tanto, es la mayor unidad de información que se puede obtener con una petición HTTP.
- **Subsegmentos:** En caso de que los segmentos estén divididos en subsegmentos, éstos estarán presentes en un Índice de Segmentos, el cual proporciona el intervalo de tiempo y el rango de bytes que ocupa el subsegmento.

La funcionalidad principal del cliente DASH es poder cambiar de representaciones sin cortes. DASH permite que diferentes versiones codificadas de un mismo contenido multimedia tengan un timeline común, lo que permite cambiar de versión sin fallos de sincronización. Un segundo timeline se usa para mostrar a los clientes la disponibilidad de los segmentos especificados en las URLs HTTP. Dependiendo de cómo queramos retransmitir el contenido, tendremos un tipo distinto de Media Presentation:

- **Static Media Presentations** para contenido bajo demanda.
- **Dynamic Media Presentations** para contenido en directo.

Media Stream Access Point

Un SAP o Media Stream Access Point es una posición en una representación que permite obtener el media stream únicamente con la información de la representación comenzando de esa posición en adelante.

Los SAPs son importantes en dos aspectos:

- Para acceder arbitrariamente a la Media Presentation al principio o tras un error.
- Para cambiar entre dos representaciones.

2.2.4 Estudios

Desde que surgió MPEG-DASH se han realizado una gran cantidad de estudios aprovechando las características de este estándar para visualizar vídeos con la mejor calidad posible. A continuación se describirán los puntos más importantes de estos estudios.

Thorsten Lhomar y otros [25] mencionan la importancia de tener un delay reducido en las transmisiones en directo, especialmente en las retransmisiones deportivas en las

cuales el público puede escuchar si su equipo ha marcado un tanto por los gritos de los vecinos o los aficionados presentes en algún bar cercano. Un menor delay puede resultar en un overhead mayor, por lo que el proveedor de contenidos deberá encontrar el balance adecuado entre delay y overhead en función del contenido. El total del delay que se produce proviene de la segmentación, la solicitud de segmentos de forma asíncrona, el tiempo de descarga y el buffering del cliente. A su vez, los segmentos de menor duración son los que introducen un mayor overhead, por lo que sólo deberán usarse cuando la reducción del delay sea prioritaria.

Según Stefan Lederer y otros [26], los segmentos más cortos producen un mayor overhead, que da como resultado un mayor número de cambios de calidad. Mientras que los segmentos de larga duración no son los adecuados para redes con grades fluctuaciones de ancho de banda. También concluyen que el rendimiento cae significativamente al usar servidores web que no permiten conexiones persistentes. Finalmente, detectan que para servidores web con conexiones no persistentes, la duración de segmento ideal es de 5 a 8 segundos y, para servidores web con conexiones persistentes, de 2 a 3 segundos.

Existen diversos estudios que proponen algoritmos para mejorar el rendimiento de MPEG-DASH y los problemas de buffering como el de ShengHong Hu y otros [27] y Yuming Cao y otros [28].

ShengHong Hu y otros han desarrollado dos esquemas de adaptación (adaptation schemes) basados en PANDA (Probe and Adapt) y la programación dinámica utilizando la librería libdash 3.0. Los resultados preliminares muestran que los esquemas de adaptación propuestos pueden adaptar el bitrate del vídeo según el ancho de banda de la red y el tipo de contenido de vídeo. Los esquemas pueden seleccionar un vídeo de la misma calidad para segmentos que pertenecen a una misma escena para evitar la oscilación de calidad y mantener una QoE constante durante la escena. La capacidad de reservar recursos del buffer para escenas con poco contenido hace que los esquemas de adaptación (content-aware) puedan lidiar con los cambios de contenido del vídeo y evitar que se congele la imagen en las escenas con mucho movimiento. Teniendo en cuenta que las escenas con más movimiento son las más populares, los esquemas de adaptación pueden dedicarles vídeos de mayores calidades y más recursos de buffer para obtener una buena QoE.

Yuming Cao y otros proponen un algoritmo de adaptación con un modelo de buffer de intervalo fijo para streaming HTTP dinámico. La idea principal es mantener la representación en una misma calidad hasta que el buffer esté desbordado o se haya vaciado, cambiando con la medida del ancho de banda de la red. Otro algoritmo selecciona de forma simultánea la representación idónea cuando el buffer no ha alcanzado el límite inferior.

Se han realizado varios estudios sobre la QoE de los vídeos empleando el estándar MPEG-DASH. Bjorn J Villa y otros [29] concluyen que los bitrates bajos pero constantes obtienen mayor QoE que los vídeos donde hay cambios constantes, a pesar de que las representaciones tengan mayor calidad. A. Sideris y otros [30] investigan el efecto de la injusticia de QoE cuando múltiples usuarios están solicitando un vídeo DASH. Cuando dos usuarios solicitan un vídeo, el que tiene los segmentos

de menor duración es el que sale perjudicado. Por último, Christian Timmerer y otros [31] describen los parámetros que afectan a la QoE en las soluciones DASH:

- Delay inicial: Es el tiempo que transcurre entre que se realiza la petición del contenido y se comienza a reproducir. También depende de si el contenido es en directo o bajo demanda.
- Stall o congelación de la imagen: Se produce debido a un subdesbordamiento del buffer. En la práctica, los usuarios a los que se les congela la imagen califican la QoE de baja, por lo cual, deben evitarse incluso a pesar de tener que incrementar el delay inicial.
- Cambios de calidad: En redes donde las condiciones fluctúan se suele cambiar de calidad para evitar subdesbordamientos del buffer y, poder reproducir el vídeo de forma fluida. Sin embargo, si pasa a menudo o cambia de una calidad muy alta a una muy baja, puede afectar negativamente a la QoE.
- Rendimiento del contenido multimedia en el cliente: Se mide en bits por segundo y generalmente, cuanto mayor es más QoE se obtiene, pero no debe usarse en solitario, siempre en conjunto con las medidas anteriores.

Como conclusión, obtienen que aumentar el delay inicial no afecta significativamente a la QoE, pero que se congele la imagen supone un gran decremento de la QoE y, por tanto, debe ser evitado.

Por último, se han realizado estudios con MPEG DASH en aplicaciones médicas, tal como propone Ognen Ognenoski y otros [32]. Ellos emplean MPEG-DASH en vídeos de ultra-sonidos. Para obtener una mejor calidad de imagen proponen utilizar segmentos de tamaño grande con la aproximación basada en margen. A su vez, se pueden aplicar otros conceptos como los vídeos de múltiples puntos de vista. Toshiro Nunome y otros [33] configuran un MPD para que el usuario pueda seleccionar el ángulo desde el que desea ver el vídeo.

Capítulo 3: Proceso de creación de los MPDs

Para crear los MPDs se ha seguido el proceso descrito en la figura 2. Primero se selecciona el vídeo que se quiere transmitir con MPEG DASH, después se generan los vídeos a distintas calidades y, por último, se genera el MPD a partir de esos vídeos.

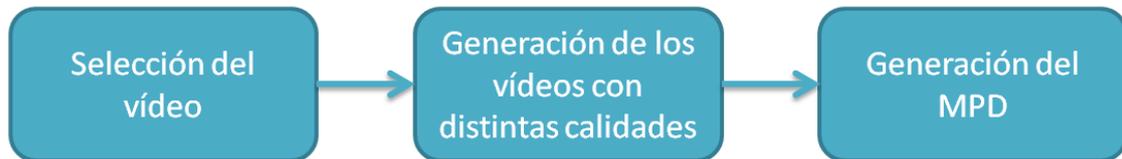


Figura 2: Diagrama de bloques del proceso de creación de un MPD

3.1 Software utilizado

A continuación se describen las herramientas utilizadas en el proceso de creación de los MPDs así como en su reproducción.

3.1.1 ffmpeg

FFmpeg [34] es una colección de software multimedia libre capaz de codificar, decodificar, transcodificar, multiplexar, demultiplexar, hacer streaming, filtrar y reproducir prácticamente la totalidad de los formatos disponibles. A pesar de estar desarrollado en GNU/LINUX, este software se puede compilar en gran cantidad de sistemas operativos, LINUX, Windows, MAC OS X, Solaris, entre ellos.

La colección contiene libavcode , libavutil, libavformat, libavfilter, libavdevice, libswscale y libswresample los cuales se pueden emplear en aplicaciones y ffmpeg, ffmpegserver, ffmpegplay y ffmpegprobe los cuales pueden emplear los usuarios finales para transcodificar, realizar streaming y reproducir contenido multimedia.

Continuación se describen las herramientas y las librerías que conforman ffmpeg:

- ffmpeg: es un convertidor de audio y vídeo que puede incluso convertir contenido multimedia procedente de una fuente en directo.
- ffmpegserver: es un servidor de streaming de audio y vídeo. Permite realizar el streaming simultáneo de varias fuentes en directo, y de ficheros.
- ffmpegplay: es un reproductor multimedia que usa las librerías de ffmpeg y SDL.
- ffmpegprobe: es un analizador de flujos multimedia que imprime por pantalla las características de de los flujos.
- libavutil: esta librería está formada por un conjunto de funciones que permiten simplificar la programación, la generación de números aleatorios, las estructuras de datos y las rutinas matemáticas, entre otras funcionalidades.
- libavcodec: contiene codificadores y decodificadores para gran cantidad de codecs de audio y vídeo.

- libavformat: contiene multiplexores y demultiplexores para los formatos de contenedores multimedia.
- libavdevice: contiene dispositivos de entrada y salida que graban y renderizan en los entornos de software entrada/salida multimedia más comunes, como Video4Linux, Video4Linux2, Vfw y ALSA.
- libavfilter: contiene filtros multimedia.
- libsawcale: lleva a cabo operaciones de escalado de imagen y conversiones de formato de color espacio/pixel.
- libswresample: realiza operaciones de resampling, rematrixing y conversión de formato de muestreo.

3.1.2 Gpac

Gpac [35] es un entorno multimedia open source. El software se centra en tecnologías de gráficos y animación, así como en formatos de paquetización multimedia como mp4. Gpac provee tres herramientas basadas en la librería libgpac:

- Osmo4/MP4Client: un reproductor multimedia.
- MP4Box: un paquetizador multimedia.
- Otras herramientas incluidas en MP4Box y aplicaciones MP42TS.

Gpac es multiplataforma. Actualmente es compatible con Windows, Linux, MacOSX, Android, iOS, WindowsMobile, Embedded Linux y algunos sistemas Symbian OS.

3.2 Instalación y configuración del software

El proceso de instalación varía en función del sistema operativo empleado. En este caso, se han empleado dos PCs con los sistemas operativos Windows 7 y Windows 8 de 64 bits. Por tanto, las explicaciones que se realizan son específicas para este entorno.

A continuación se describe el proceso de instalación y configuración del software empleado:

3.2.1 ffmpeg

Primero se ha descargado el paquete con el software de ffmpeg [36] adecuado a las características del equipo empleado. En la figura 3 se aprecia las diversas versiones disponibles. En este caso se ha descargado la versión FFmpeg git-9ac154d 64-bit Static.

Latest Zerano FFmpeg Build Version: git-9ac154d (2016-04-25)

32-bit Downloads	64-bit Downloads
Download FFmpeg git-9ac154d 32-bit Static	Download FFmpeg git-9ac154d 64-bit Static
Previous FFmpeg 32-bit Static Versions	Previous FFmpeg 64-bit Static Versions
Download FFmpeg git-9ac154d 32-bit Shared	Download FFmpeg git-9ac154d 64-bit Shared
Previous FFmpeg 32-bit Shared Versions	Previous FFmpeg 64-bit Shared Versions
Download FFmpeg git-9ac154d 32-bit Dev	Download FFmpeg git-9ac154d 64-bit Dev
Previous FFmpeg 32-bit Dev Versions	Previous FFmpeg 64-bit Dev Versions

Figura 3: Versiones disponibles de software ffmpeg

El contenido que se descarga es un fichero .zip que se ha de descomprimir y renombrar como ffmpeg para simplificar.

A continuación, se debe añadir la carpeta bin al path del sistema. Para ello se debe añadir C:\ffmpeg\bin al path del sistema. Para acceder a él primero se hace click en inicio, se pincha con el botón derecho sobre **equipo** y se selecciona **propiedades**. A continuación se accede a **Configuración avanzada del sistema** y se selecciona **Variables de entorno**. Por último, se selecciona **PATH** en las Variables de usuario, se presiona **Editar** y se pega el path. En las figuras 4 y 5 se pueden observar los pasos que se han descrito anteriormente.

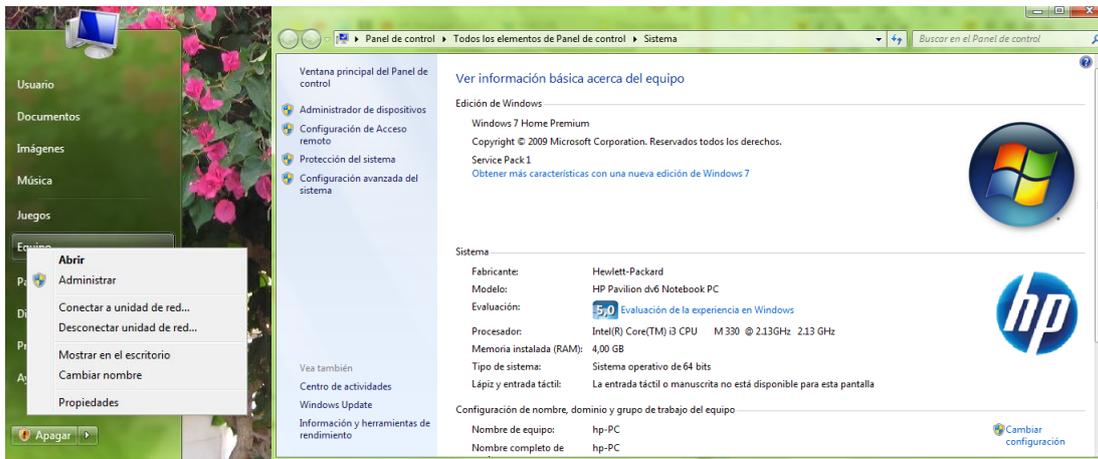


Figura 4: Configuración ffmpeg 1

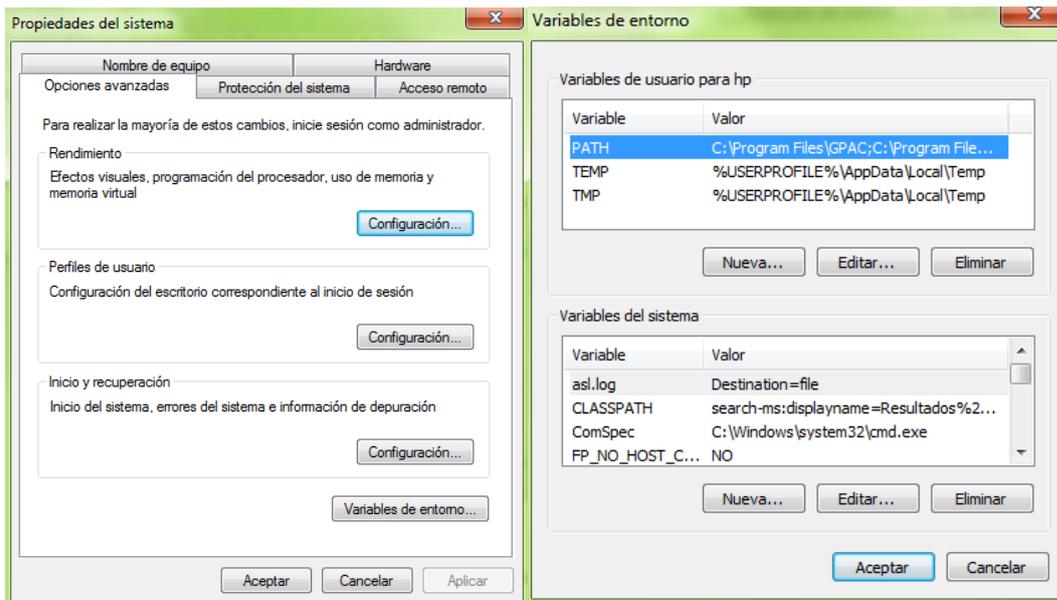


Figura 5: Configuración de ffmpeg 2

3.2.2 Gpac

Para instalar gpac en Windows se accede a la página de descargas [37] y se selecciona el enlace de Windows 64 bits. Se descarga un instalador que se debe ejecutar y, a continuación, se siguen los pasos que se van marcando. En las figuras 6, 7 y 8 se presentan las instrucciones que se han de seguir en el instalador. Se tienen que presionar los botones **Next** y **I agree** que el propio instalador va marcando en color azul.

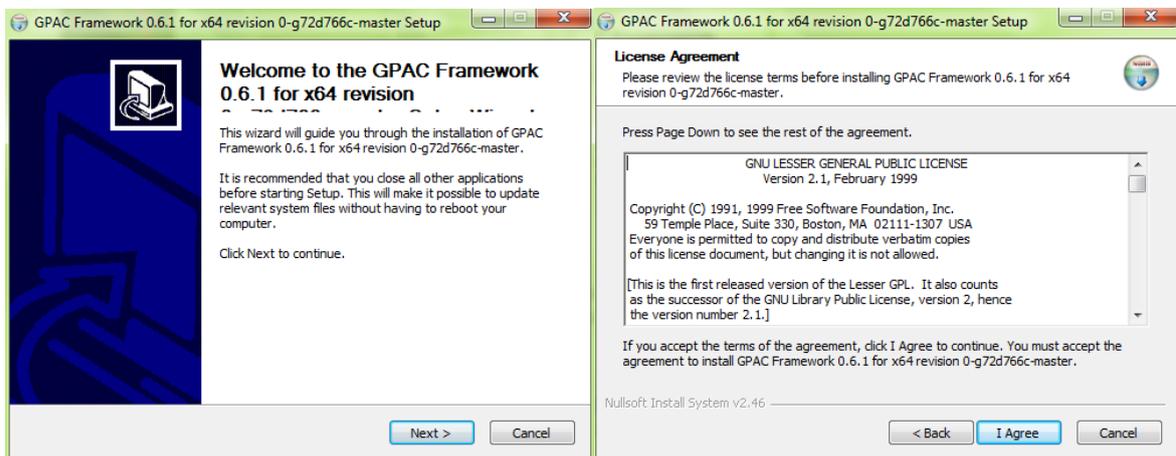


Figura 6: Proceso de instalación de Gpac pasos 1 y 2

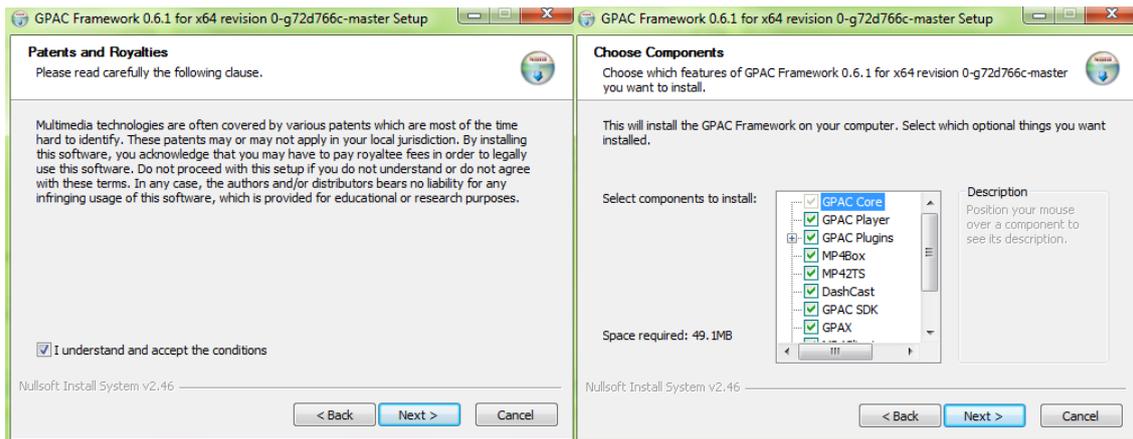


Figura 7: Proceso de instalación Gpac pasos 3 y 4

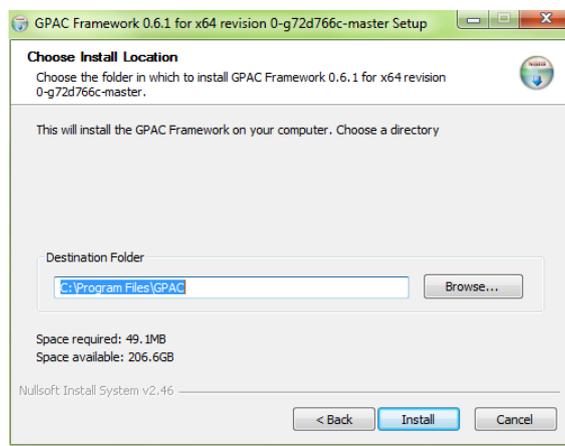


Figura 8: Proceso de instalación Gpac paso 5

3.3 Creación de los MPDs

Para crear los MPDs primeramente se han seleccionado los vídeos de Polimedia que se han considerado interesantes para este proyecto. El vídeo seleccionado [38] es un ejemplo de vídeo típico de la plataforma, donde aparece el profesor en la esquina inferior derecha y las transparencias ocupando la mayor parte de la pantalla, todo esto sobre fondo blanco.

Las características del vídeo son las que aparecen en la Tabla 3.

Duración	Códec	Bitrate	Resolución
5:33	H264	2254Kbps	1280x720

Tabla 3: Características del vídeo de referencia

Puesto que MPEG DASH es un estándar de streaming adaptativo, se deben tener diferentes resoluciones del vídeo seleccionado para poder variar de una a otra. Para obtener éstos vídeos se utilizará el software ffmpeg.

Se ejecuta la ventana de comandos y se accede al directorio donde se quieren almacenar los vídeos. Una vez en el directorio deseado, se ejecuta el siguiente comando:

```
ffmpeg -i nombre del vídeo -profile:v baseline -s resolución deseada -c:a copy nombre del vídeo resultante
```

-i : input es el nombre del vídeo de entrada.

-profile:v baseline se emplea para mantener las características del códec del vídeo de entrada.

-s: size es el tamaño de cuadro al que se quiere cambiar el vídeo.

-c:a copy se emplea para que el vídeo resultante sea un fichero distinto. Se ha de introducir el nombre deseado para el vídeo de salida.

En este caso los comandos que se han ejecutado han sido:

```
ffmpeg -i polimedia_muxed.mp4 -profile:v baseline -s 1024x576 -c:a copy polimedia_muxed-576.mp4
```

```
ffmpeg -i polimedia_muxed.mp4 -profile:v baseline -s 640x360 -c:a copy polimedia_muxed-360.mp4
```

Para el tamaño de cuadro 1280x720 se ha creado un vídeo con las mismas características que el vídeo original exceptuando el códec, que se ha cambiado a libx264, para evitar problemas cuando se cambia de calidad.

```
ffmpeg -i polimedia_muxed.mp4 -profile:v baseline -b:v 2254 -c:a copy polimedia_muxed_720b1.mp4
```

La opción -b:v permite seleccionar el bitrate deseado para el vídeo.

Las características de los vídeos resultantes son las que se muestran en la Tabla 4.

Duración	Códec	Bitrate	Resolución
5:33	libx264	2408 Kbps	1280x720
5:33	libx264	426 Kbps	1024x576
5:33	libx264	190 Kbps	640x360

Tabla 4: Características de los vídeos resultantes

A continuación, se emplea el software MP4Box [39][40] para crear el MPD de los vídeos con distintas resoluciones. Para ello se emplea el siguiente comando:

```
MP4Box -dash duración -rap -frag-rap -profile perfil fichero de vídeo fichero de audio
```

-dash es la duración de los segmentos en milisegundos.

-rap -frag-rap fuerza a que los segmentos comiencen con un Random Access Point.

-profile permite seleccionar el tipo de perfil. Éste puede ser onDemand o live.

En caso de que el audio y el vídeo estén multiplexados, como ocurre con el vídeo que se ha empleado, hay que escribir detrás del nombre del vídeo #video y volver a escribirlo con #audio tal como se muestra en el comando que se ha empleado.

```
MP4Box -dash 2000 -rap -frag-rap -profile onDemand
polimedia_muxed_720b1.mp4#video polimedia_muxed3D-576.mp4#video
polimedia_muxed3D-360.mp4#video polimedia_muxed3D_720b1.mp4#audio
```

Para el audio sólo se emplea una calidad ya que sólo se está estudiando el vídeo, pero no se elimina para detectar posibles errores de sincronización entre los flujos de vídeo y audio.

El resultado es un fichero xml con extensión .mpd donde se especifican los vídeos y los audios disponibles, tal como se muestra en la figura 9. Como se puede apreciar, dentro del periodo hay dos sets de adaptación, uno para audio y otro para vídeo, cada uno con sus representaciones correspondientes.

```
<?xml version="1.0"?>
<!-- MPD file Generated with GPAC version 0.6.2-DEV-rev336-ga721ef5-master at 2016-06-07T11:08:07.187Z-->
<MPD xmlns="urn:mpeg:dash:schema:mpd:2011" minBufferTime="PT1.500S" type="static" mediaPresentationDuration="PT0H5M33.680S"
maxSegmentDuration="PT0H0M10.000S" profiles="urn:mpeg:dash:profile:isoff-on-demand:2011">
<ProgramInformation moreInformationURL="http://gpac.sourceforge.net">
<Title>polimedia_muxed_720b1_dash.mpd generated by GPAC</Title>
</ProgramInformation>

<Period duration="PT0H5M33.680S">
<AdaptationSet segmentAlignment="true" maxWidth="1280" maxHeight="720" maxFrameRate="25" par="16:9" lang="und"
subsegmentAlignment="true" subsegmentStartsWithSAP="1">
<Representation id="1" mimeType="video/mp4" codecs="avc1.42c01f" width="1280" height="720" frameRate="25" sar="1:1"
startWithSAP="1" bandwidth="2241996">
<BaseURL>polimedia_muxed_720b1_track1_dashinit.mp4</BaseURL>
<SegmentBase indexRangeExact="true" indexRange="915-1366">
<Initialization range="0-914"/>
</SegmentBase>
</Representation>
<Representation id="3" mimeType="video/mp4" codecs="avc1.42c01f" width="1024" height="576" frameRate="25" sar="1:1"
startWithSAP="1" bandwidth="260866">
<BaseURL>polimedia_muxed_576_track1_dashinit.mp4</BaseURL>
<SegmentBase indexRangeExact="true" indexRange="916-1367">
<Initialization range="0-915"/>
</SegmentBase>
</Representation>
<Representation id="4" mimeType="video/mp4" codecs="avc1.42c01e" width="640" height="360" frameRate="25" sar="1:1"
startWithSAP="1" bandwidth="124123">
<BaseURL>polimedia_muxed_360_track1_dashinit.mp4</BaseURL>
<SegmentBase indexRangeExact="true" indexRange="916-1367">
<Initialization range="0-915"/>
</SegmentBase>
</Representation>
</AdaptationSet>
<AdaptationSet segmentAlignment="true" lang="unk" subsegmentAlignment="true" subsegmentStartsWithSAP="1">
<Representation id="2" mimeType="audio/mp4" codecs="mp4a.40.2" audioSamplingRate="44100" startWithSAP="1"
bandwidth="164276">
<AudioChannelConfiguration schemeIdUri="urn:mpeg:dash:23003:3:audio_channel_configuration:2011" value="2"/>
<BaseURL>polimedia_muxed_720b2_track2_dashinit.mp4</BaseURL>
<SegmentBase indexRangeExact="true" indexRange="864-1567">
<Initialization range="0-863"/>
</SegmentBase>
</Representation>
</AdaptationSet>
</Period>
</MPD>
```

Figura 9: Ejemplo de MPD

Para comprobar su funcionamiento se han creado MPDs con distintas duraciones de segmento. Para ello, se han empleado las expresiones anteriores variando el valor asignado a –dash. Las duraciones de segmentos que se han estudiado se muestran en la Tabla 5.

2000 ms	8000 ms	20000 ms
4000 ms	10000ms	25000 ms
6000 ms	15000 ms	30000 ms

Tabla 5: Duraciones de los segmentos de los MPDs

Capítulo 4: Instalación y configuración del servidor multimedia

El proceso de creación del servidor es el descrito en la figura 10. Primero se instala el software necesario, después se colocan los vídeos en el servidor y, por último, se crean los archivos xml con el nombre de los MPDs.



Figura 10: Diagrama de bloques del proceso de creación del servidor

4.1 Software utilizado

4.1.1 Máquina virtual Ubuntu 14.04.2

Para montar el servidor se ha empleado una máquina virtual Ubuntu [41] 14.04.2 (GNU/Linux 3.13.0-48-generic x86_64) con 35.07 Gb de memoria proporcionada por los técnicos de Polimedia. Ubuntu es una plataforma software open source con soluciones para servidores, sistemas operativos, teléfonos, tablets, cloud e internet de las cosas.

4.1.2 MobaXterm

La máquina virtual se encuentra en un servidor del ASIC (Área de Sistemas de la Información y las Comunicaciones) perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia. Para trabajar con ella es necesario un software que nos permita acceder de forma remota. MobaXterm [42] es un terminal para Windows con un servidor X11 y un cliente SSH.

Una vez descargado el software, se ejecuta y se presiona el botón **Session**. Después se selecciona SSH y se introduce el nombre del host remoto. En la figura 11 se muestra el proceso de configuración descrito anteriormente.

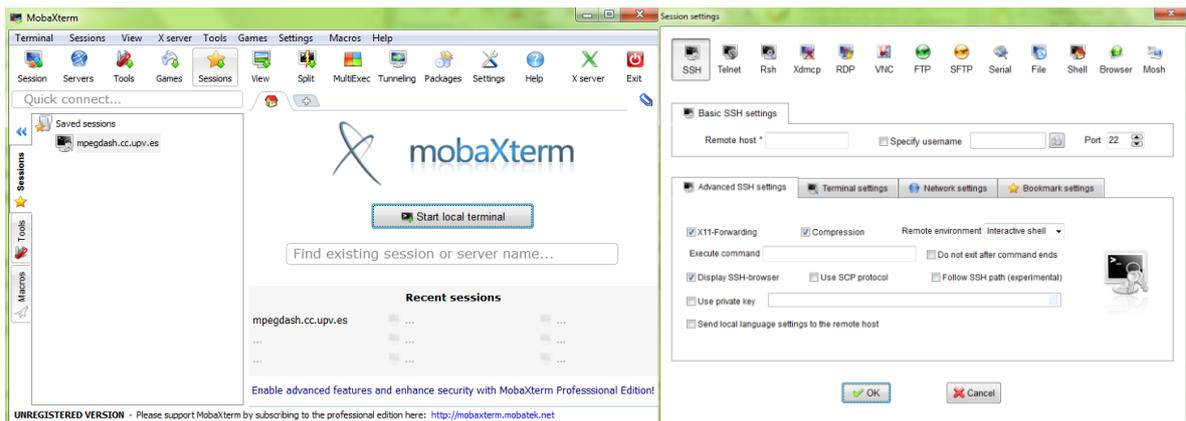


Figura 11: Configuración de MobaXterm

4.1.3 Paella Player

Paella Player [43] es un reproductor HTML5 de video multiflujo desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. Es el reproductor de vídeo que se emplea en la plataforma Polimedia y se ha utilizado en la máquina virtual para montar el servidor. Para ello se han instalado otros softwares necesarios para el correcto funcionamiento de Paella.

4.1.3.1 Node.js

Node.js [44] es un entorno en tiempo de ejecución multiplataforma que se puede emplear para crear servidores web. Es open source y está basado en el lenguaje de programación ECMAScript.

Para instalar Node.js en la máquina virtual Ubuntu se han introducido estos comandos:

```
curl -sL https://deb.nodesource.com/setup_4.x | sudo -E bash -
sudo apt-get install -y nodejs
sudo apt-get install -y build-essential
```

Una vez instalado Node.js, se procede a descargar Paella Player mediante el comando:

```
git clone https://github.com/polimediaupv/paella.git
```

4.1.3.2 Grunt

Gruntjs [45] es un software que se emplea para automatizar procesos para evitar tener que realizar acciones repetitivas. Este software es necesario para el correcto funcionamiento de Paella Player y para instalarlo se emplean los siguientes comandos:

```
sudo npm -g install grunt-cli jshint
```

```
npm install
```

Una vez instalado Grunt se ejecuta el siguiente comando:

```
grunt build.release
```

Tras esto, ya se puede utilizar Paella Player. Pero, dentro de las ramas disponibles, se ha empleado la rama “develop” y, por tanto, debemos cambiar a esa rama. Para ello se ejecuta:

```
git checkout -b develop origin/develop
```

```
git pull
```

Finalmente, para iniciar el servidor local con Paella se introduce el comando:

```
grunt server.release --force
```

Esto nos permite emplear la máquina virtual como servidor. Para acceder a ella se debe introducir “http://localhost:8000” en el navegador.

4.2 Colocación de los vídeos en el servidor

Para servir un vídeo es necesario crear una carpeta dentro de paella /repository_test /repository que a su vez esté dividida en otras carpetas donde se encontrarán los archivos de vídeo junto a sus correspondientes MPDs. Dentro de cada una de las carpetas se debe colocar un archivo llamado “data.json”. Es un fichero xml como el que aparece en la figura 12.

```
{
  "metadata": {
    "duration": 0,
    "title": "UPV-TV"
  },
  "streams": [
    {
      "sources": {
        "mpd": [
          {
            "src": "Agris.mpd",
            "mimetype": "video/mp4"
          }
        ],
        "hls": [
          {
            "src": "http://playertest.longtailvideo.com/adaptive/bipbop/bipbop.m3u8",
            "mimetype": "video/mp4",
            "res": {
              "w": "1280",
              "h": "720"
            }
          }
        ]
      },
      "preview": "490512.jpg"
    }
  ]
}
```

Figura 12: Ejemplo de fichero data.json

Para que funcione correctamente es necesario cambiar el campo “src” por el nombre del archivo MPD.

Capítulo 5: Pruebas

A continuación se describen las pruebas que se han realizado para observar el funcionamiento del estándar MPEG DASH y determinar de forma subjetiva la calidad de experiencia del usuario en un entorno real.

Para realizar las pruebas se ha optado por utilizar los primeros 90 segundos del vídeo. En las pruebas de laboratorio se ha empleado como servidor un portátil con procesador i3, 4Gb de RAM y sistema operativo de 64 bits, configurado tal como se expone en el capítulo 4. En las pruebas subjetivas de calidad de experiencia en un entorno real, se ha utilizado como servidor una máquina virtual Ubuntu, descrita en el apartado 4.1.

El vídeo empleado es un ejemplo típico de los vídeos utilizados en la plataforma Polimedia, donde el profesor aparece en la esquina inferior derecha de la pantalla y las transparencias ocupan prácticamente la totalidad de la pantalla, situándolas un poco desplazadas hacia la izquierda para compensar la figura del profesor, como se muestra en la figura 13.



Figura 13: Inicio del vídeo de Polimedia empleado

5.1 Elección del reproductor

Para reproducir los vídeos MPEG DASH se ha empleado el reproductor MP4Client/OSMO4 perteneciente al paquete de software GPAC, el cual se ha empleado para generar los vídeos. Éste puede ejecutarse desde la línea de comandos o con la aplicación que se muestra en la figura 14. El conocido reproductor VLC [46] presenta una opción que se puede activar para reproducir DASH pero, tras una serie de pruebas, no se logró que funcionara. Existen otros reproductores donde es necesario crear una página web para visualizar el vídeo como BITMOVIN [47] y dash.js [48] el primero es de pago a partir de un número determinado de

visualizaciones y el segundo es gratuito. Ambos disponen de una página web donde probar los vídeos DASH, BITMOVIN en [49] y dash.js en [50], pero ninguno de los vídeos disponibles en el servidor que se ha creado ha funcionado.

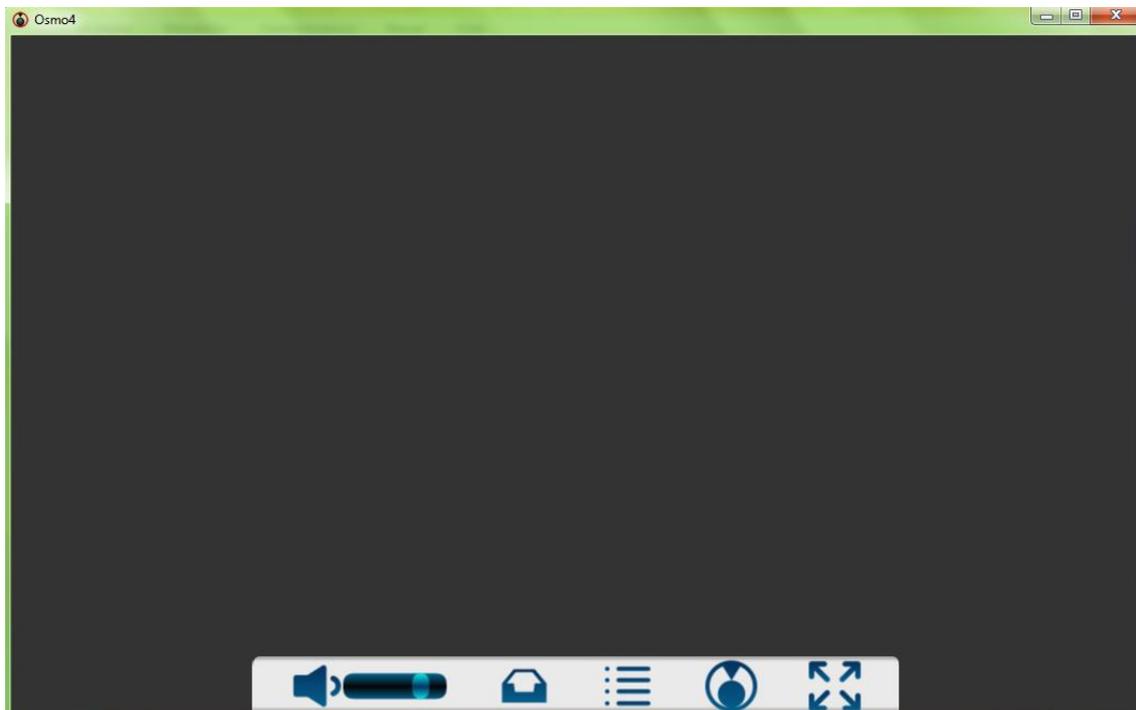


Figura 14: Aspecto del reproductor MP4Client/OSMO4

Observando el comportamiento de este reproductor, se ha detectado que siempre comienza a reproducir el contenido partiendo de la calidad más baja, independientemente de las condiciones de la red. Por ello, se ha decidido estudiar cómo afecta el tamaño de segmento y, por tanto, el tiempo que el usuario está visualizando contenido en baja calidad, a la calidad de experiencia total del vídeo.

5.2 Software utilizado

Para realizar las mediciones pertinentes ha sido necesario utilizar el siguiente software.

5.2.1 Wireshark

Wireshark [51] es un analizador de paquetes. Permite recopilar la información del tráfico de la red en directo para realizar mediciones posteriormente sin necesidad de estar conectado. Soporta cientos de protocolos y la lista se va actualizando continuamente. Es multiplataforma y permite usar técnicas de clasificación por colores. En la figura 15 se muestra la pantalla inicial de Wireshark. Para comenzar a capturar paquetes se debe seleccionar el interfaz a través del cual se quiere capturar y el programa comenzará a recopilar la información de los paquetes.

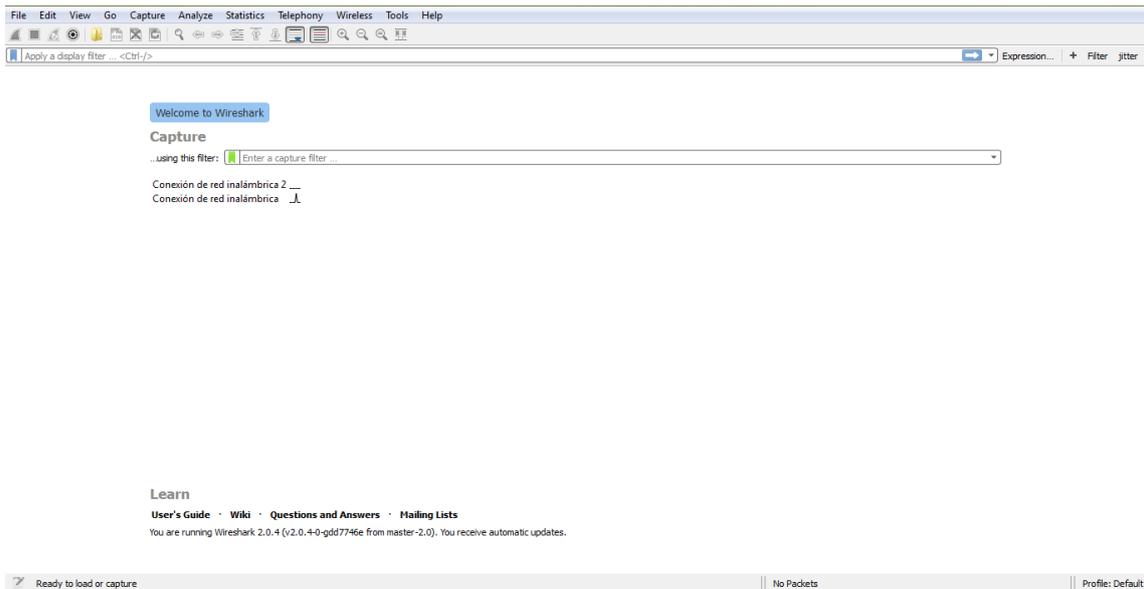


Figura 15: Pantalla inicial de Wireshark

Para obtener la información del ancho de banda del tráfico se selecciona la pestaña “I/O Graph” del menú “Statistics” como se muestra en la figura 16.

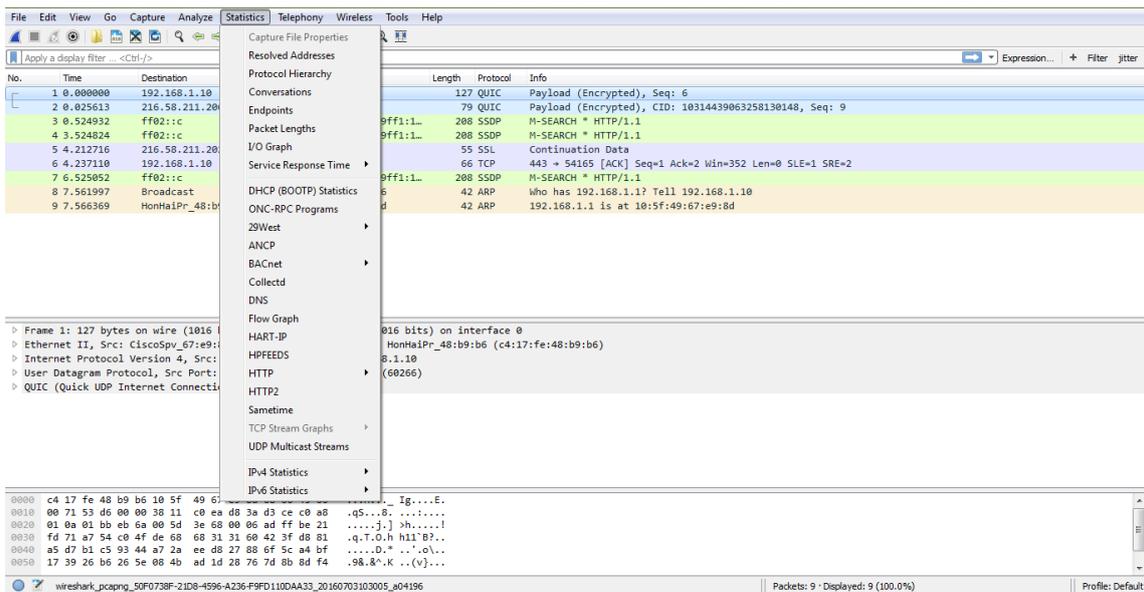


Figura 16: Obtención de ancho de banda en Wireshark

Finalmente se obtiene una gráfica como se muestra en la figura 17. El programa permite obtener los datos de las gráficas pulsando el botón “Copy”. De esta forma se puede trabajar con los datos en Excel.

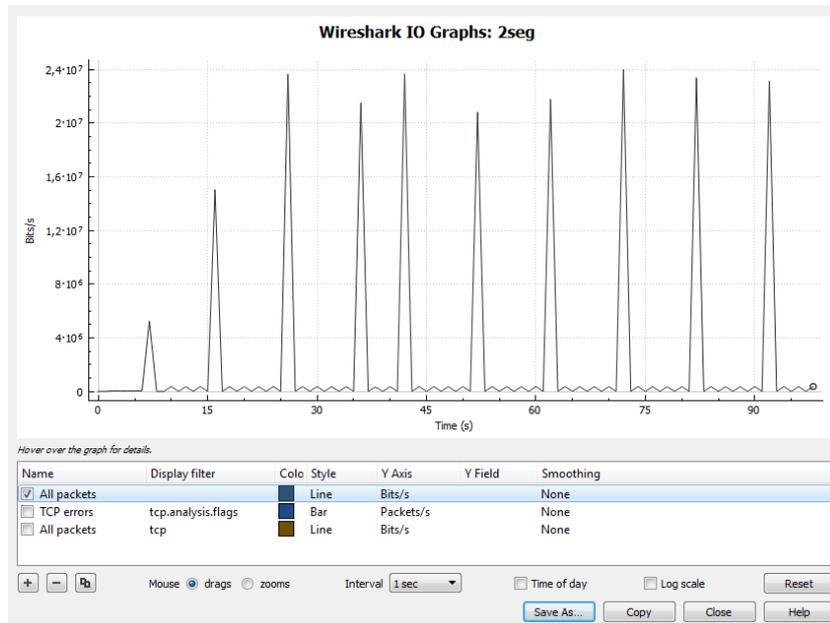


Figura 17: Gráfico de Wireshark de los paquetes capturados

5.2.2 Testtool

Se ha empleado una herramienta desarrollada por Carlos Barambones Ferrera [52] que permite inyectar tráfico en una red de forma controlada. Esta herramienta fue fruto de su Trabajo Final de Carrera, “Desarrollo de una aplicación basada en Java para testear el rendimiento de una red de datos”, de la titulación Ingeniero Técnico de Telecomunicación de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para transmitir entre los usuarios es necesario que un ordenador se encuentre en modo servidor y el resto en modo cliente. Para configurar el modo servidor sólo es necesario seleccionar ese modo en la pestaña “modo” situada en la parte superior izquierda de la aplicación (figura 18). Tras esto hay que introducir el número del puerto a través del cual se va a transmitir. Finalmente se presiona el botón “Encender”.

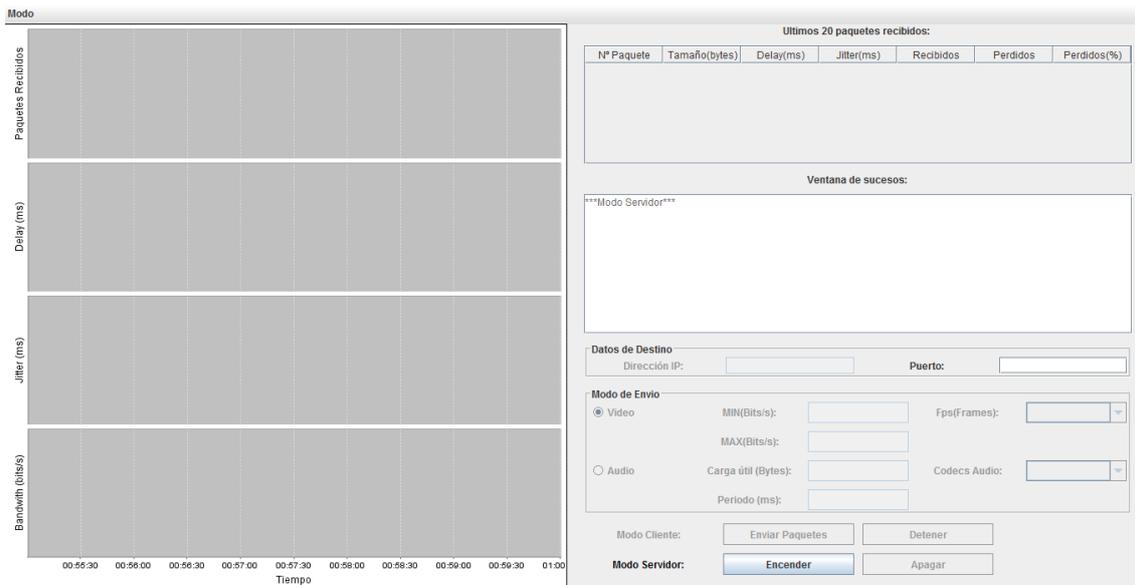


Figura 18: Modo servidor de Testool

En el modo cliente (figura 19) hay que introducir la dirección IP del ordenador que está en modo servidor, así como el número de puerto seleccionado anteriormente. Tras esto se selecciona vídeo y se introduce el tamaño del tráfico que se desea enviar. El valor mínimo en la casilla MIN y el valor máximo en la casilla MAX. Por último se seleccionan los frames por segundo. Una vez se ha configurado se presiona el botón “Enviar paquetes”.

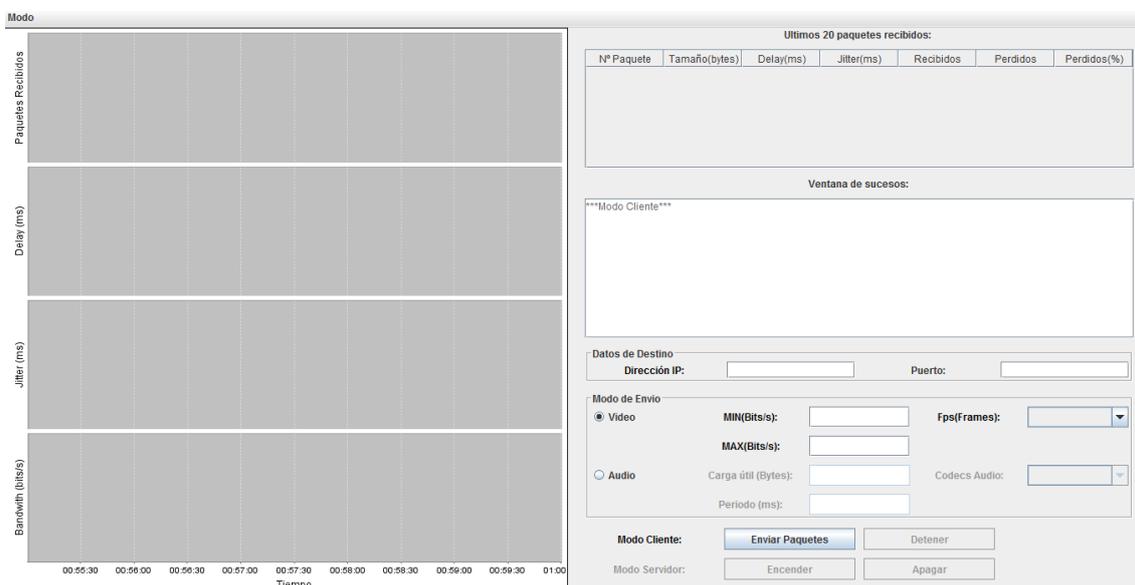


Figura 19: Modo cliente de Testool

5.3 Pruebas con red cableada en entorno controlado

Para realizar estas pruebas se ha empleado la topología de la figura 20. Como se puede apreciar, el servidor y un usuario están conectados a un switch. Éste está conectado a otro switch mediante un enlace de 100Mbps, al cual se conectan el cliente y los demás usuarios. El usuario 1 intercambia tráfico de vídeo de 2Mbps con el resto

de usuarios. Variando el número de usuarios que intercambian información, se ha podido observar las situaciones en las que MPEG DASH falla y la forma en la que el tamaño de segmento afecta.

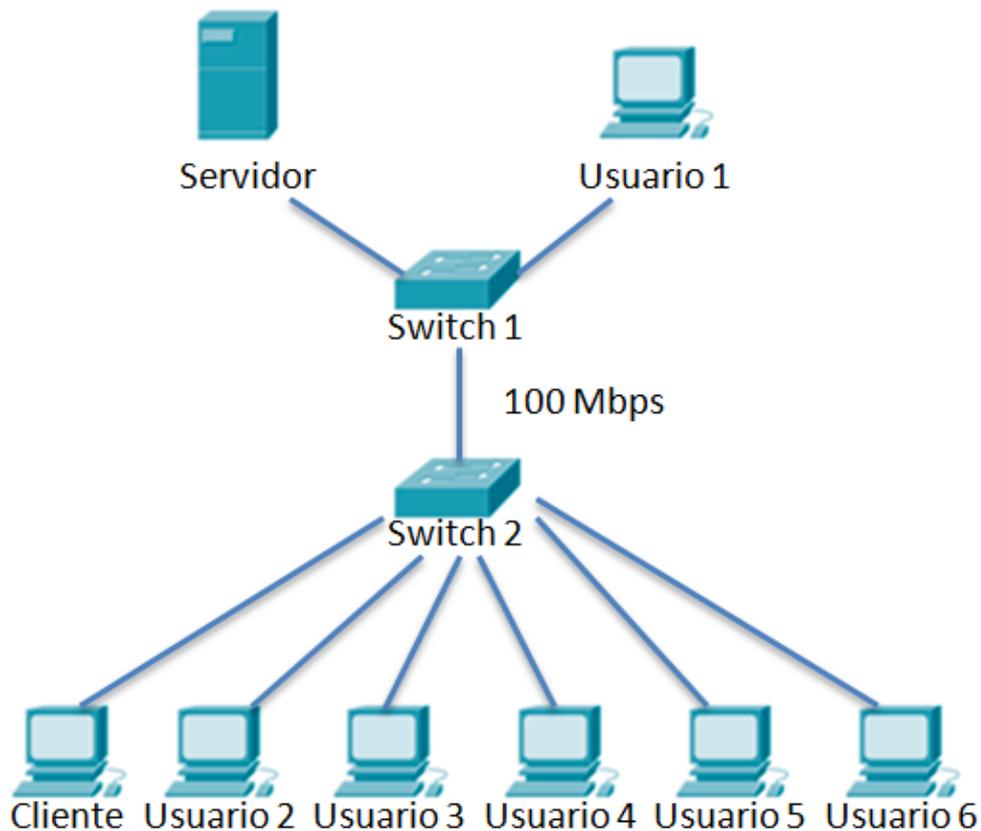


Figura 20: Topología de la red cableada

En este caso, se ha comenzado a visualizar el vídeo de cada uno de los tamaños de segmento con cero usuarios realizando transmisiones, de esta forma, se dispone de todo el ancho de banda. Paulatinamente, se ha incrementado el número de usuarios que intercambian información a 2, 4, 5 y 6. En la figura 21 se muestra el tiempo que tarda el vídeo en alcanzar la calidad a partir de la cual se alcanza una situación de estabilidad y, por tanto, no vuelve a haber cambios de calidad. En la figura 22 se muestra el número de saltos de calidad que se producen en el periodo de 90 segundos. En la figura 23 se muestra la máxima calidad que se consigue alcanzar. El valor 3 se corresponde con la calidad máxima, es decir, el tamaño de cuadro de 1280x720, el valor 2 se corresponde con la calidad media, el tamaño de cuadro 1024x576, y el valor 1 se corresponde con la calidad mínima, el tamaño de cuadro 640x360. Las tres gráficas han de observarse de forma conjunta debido a que los resultados que se muestran en ellas dependen unos de otros.

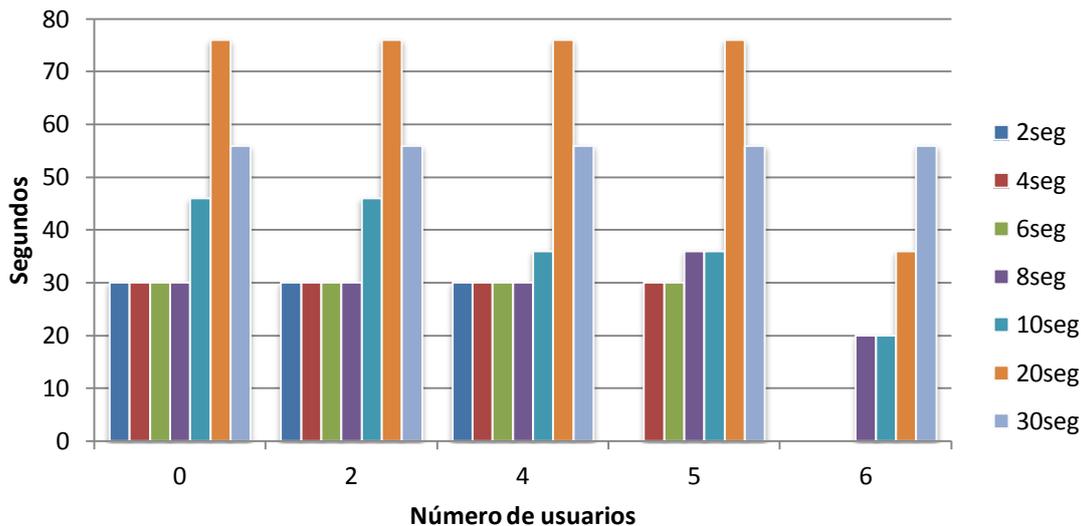


Figura 21: Tiempo de estabilidad de la red cableada

Como se puede observar en la figura 21, cada barra representa un tamaño de segmento. Están dispuestos en orden creciente para apreciar mejor cómo afecta el tamaño de segmento al tiempo que tarda en establecerse la calidad. Se aprecia que en las situaciones donde hay menos usuarios intercambiando información, es decir, hay más ancho de banda disponible, a partir del tamaño de segmento de 10 segundos el tiempo que tarda en alcanzar la estabilidad se incrementa. Para el tamaño de segmento de 30 segundos se observa un tiempo menor, en comparación con el tamaño de segmento de 20 segundos, porque la calidad máxima que alcanza, en el periodo de tiempo de 90 segundos seleccionado para realizar las pruebas, es de 1024x576, mientras que todos los anteriores alcanzan la calidad máxima. Esto se puede apreciar en la figura 23. Las barras que no aparecen en las situaciones con mayor cantidad de usuarios intercambiando información, se corresponden a una falta de estabilidad, es decir, que la calidad va variando continuamente.

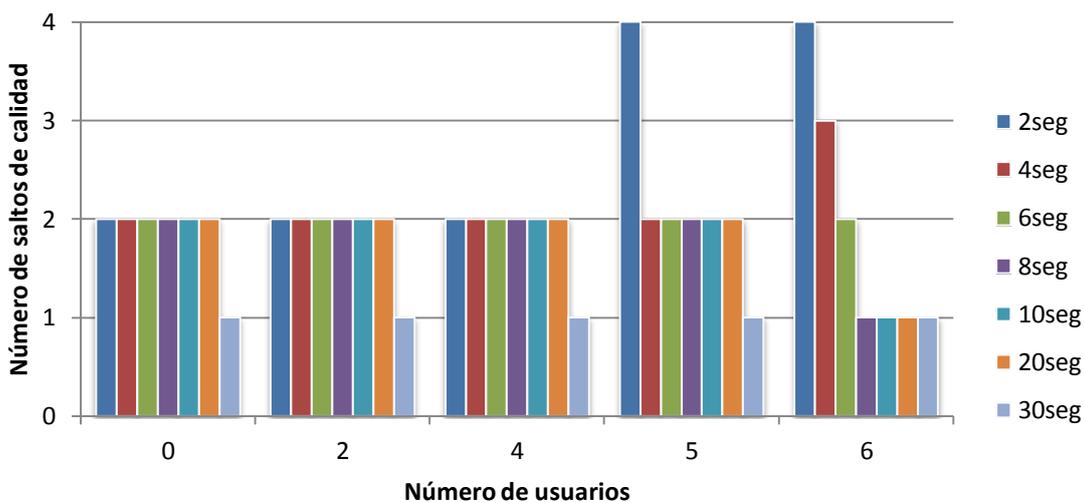


Figura 22: Número de saltos de calidad en red cableada

Se puede observar que las situaciones en las que no hay estabilidad y, por tanto, no aparecen barras en la figura 21, coinciden con las situaciones en las que se producen muchos cambios de calidad. Esto se debe a que el ancho de banda disponible en las situaciones con más usuarios, 5 o 6, es muy poco, pero si hay momentos en los que el ancho de banda que percibe la aplicación es lo suficientemente grande para mejorar la calidad, el video aumenta de calidad produciendo un salto. La razón por la que la mayor cantidad de saltos se producen en los vídeos con tamaños de segmento menores, es decir, de 2 a 6 segundos, es porque la aplicación requiere menos tiempo para realizar la decisión de cambiar de calidad o mantenerse, aumentando la probabilidad de equivocarse y, por tanto, teniendo que rectificar y aumentando el número de saltos.

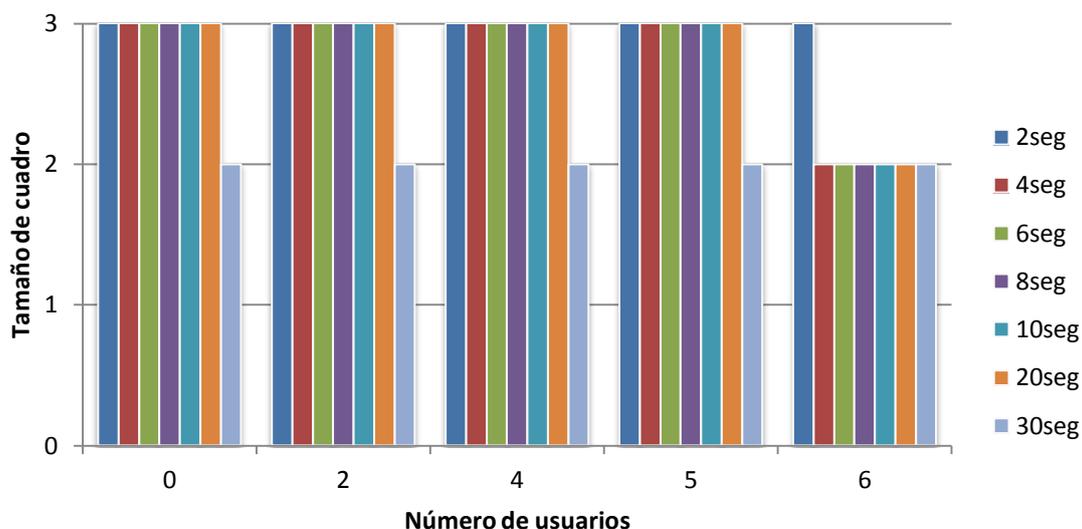


Figura 23: Calidad máxima que se alcanza en red cableada

Como se aprecia en la figura 23, los vídeos alcanzan la máxima calidad incluso con un gran número de usuarios intercambiando información, pero a partir de 5 usuarios, algunos vídeos con tamaño de segmento bajo presentan errores.

En la figura 24 se muestra el ancho de banda que utilizan los vídeos en el caso con 0 usuarios. Como se puede apreciar, se llegan a alcanzar picos de 27Mbps. Se observa que no se emplea la totalidad del ancho de banda disponible. En este caso, los tamaños de segmento comprendidos entre 2 y 8 segundos, cambian de calidad en el mismo momento. Alcanzan el tamaño de cuadro de 1024x576 en el segundo 20 y el de 1280x720 en el segundo 30.

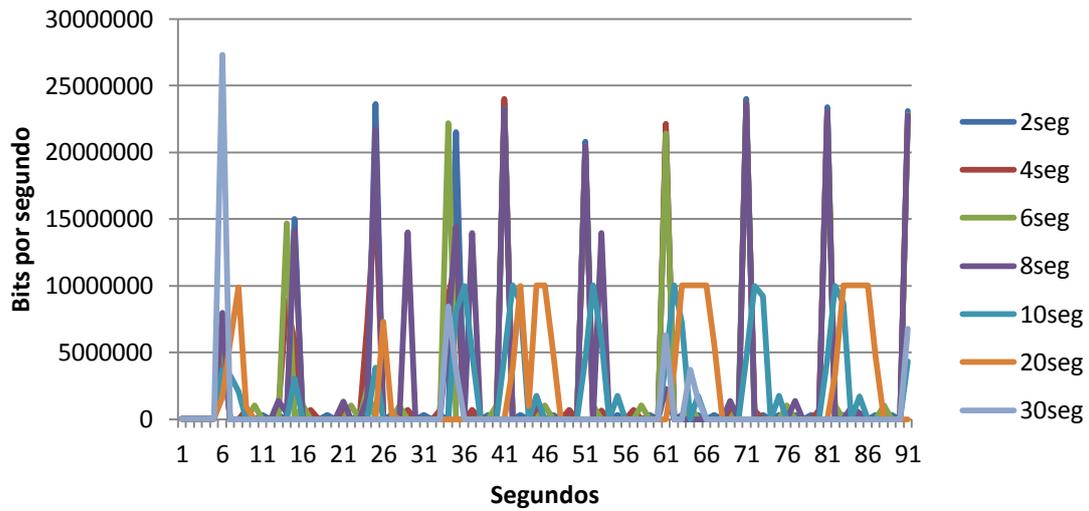


Figura 24: Ancho de banda con 0 usuarios

Con 2 usuarios el ancho de banda disponible se reduce a entre 8 y 7 Mbps, como se observa en la figura 25. Con 2 usuarios MPEG DASH funciona correctamente. No se aprecia ningún fallo en los vídeos.

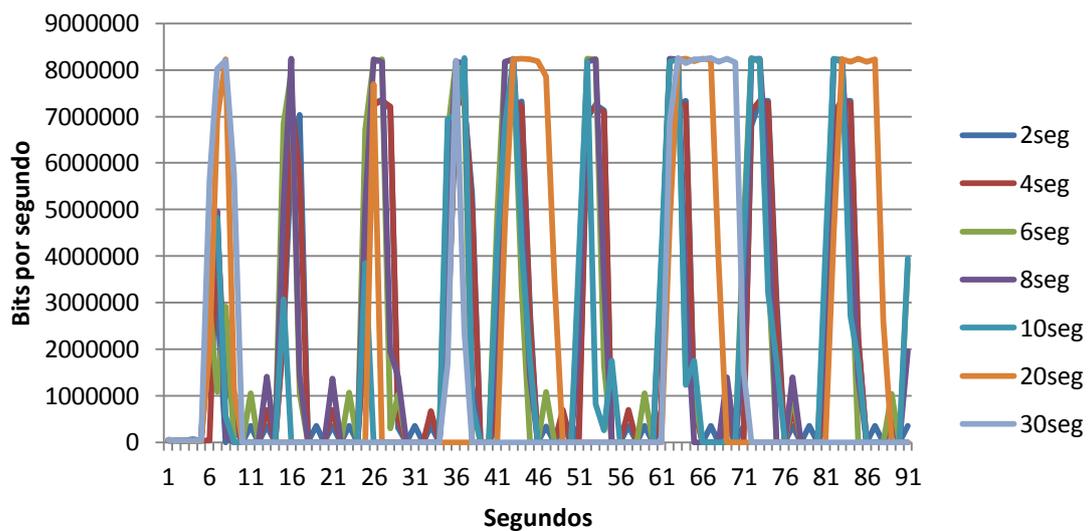


Figura 25: Ancho de banda con 2 usuarios

En la figura 26 se muestra el ancho de banda con 4 usuarios. En este caso se sitúa entre 4 y 5 Mbps. Los vídeos continúan reproduciéndose correctamente.

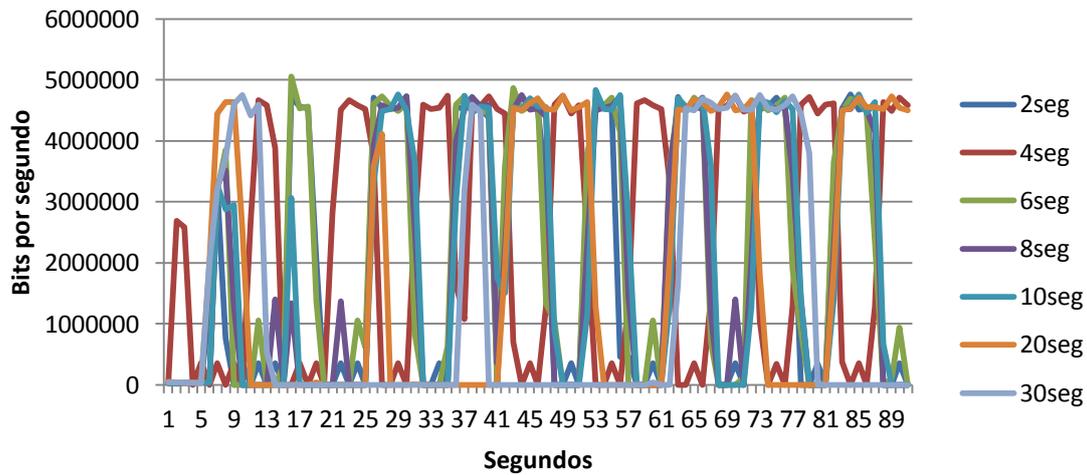


Figura 26: Ancho de banda con 4 usuarios

En la figura 27 se muestra el ancho de banda de los vídeos de 2 y 4 segundos cuando hay un intercambio de información entre 5 usuarios. El ancho de banda se mantiene entre 2,5 y 3 Mbps. Se destacan los casos de 2 y 4 segundos porque se producen errores al cambiar de calidad. Como MPEG DASH es un estándar de transmisión de vídeo adaptativo, al encontrarse problemas en la red, cambia de calidad. Los fallos que se producen se deben a que el ancho de banda disponible está en el límite a partir del cual se toma la decisión de cambiar de calidad. Con tamaños de segmento pequeños, tarda menos tiempo en tomar la decisión, y aumenta la calidad si encuentra la oportunidad, pero al no tener mucho ancho de banda disponible, el vídeo y el audio se paran y tarda un tiempo en bajar de calidad. Con el punto verde se marcan los instantes en los que el vídeo con tamaño de segmento de 2 segundos cambia de calidad. El punto negro marca el momento en el que el vídeo de 4 segundos cambia de calidad.

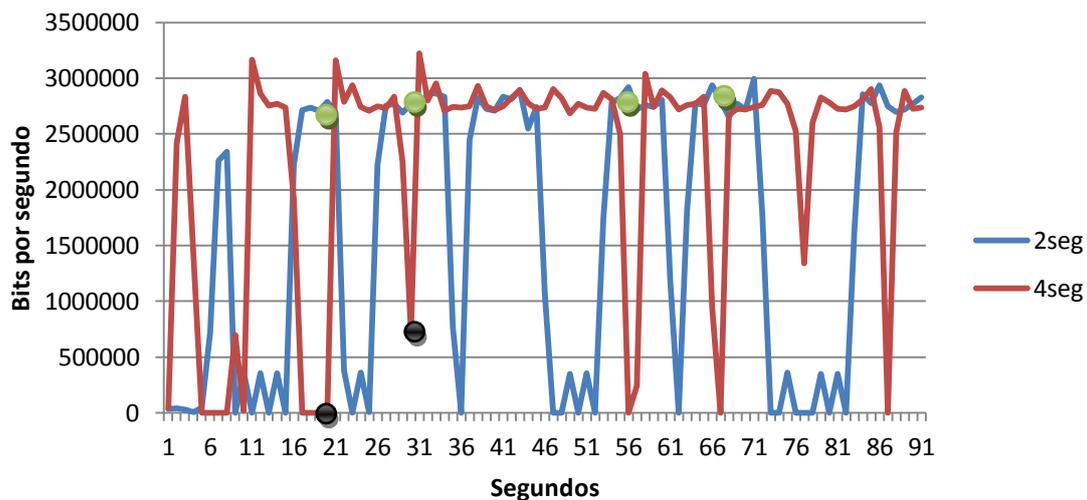


Figura 27: Ancho de banda con 5 usuarios

En la figura 28 se muestra el ancho de banda en el caso en el que 6 usuarios intercambian información. Se destacan los vídeos con tamaño de segmento entre 2 y 6

segundos porque son los que presentan fallos. Al igual que con 5 usuarios, los fallos se producen en los cambios de calidad. Además, debido a que intenta subir de calidad con el poco ancho de banda disponible, el audio deja de escucharse, priorizando el tráfico de vídeo.

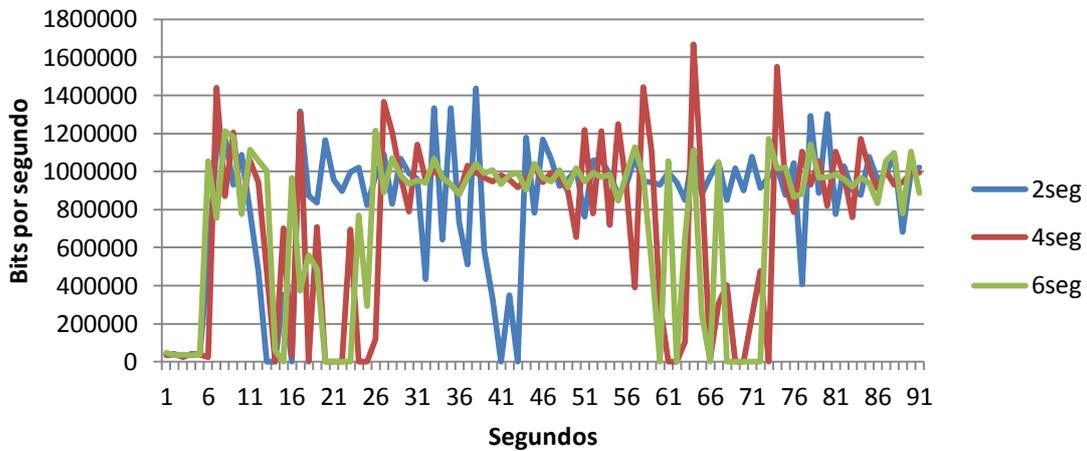


Figura 28: Ancho de banda con 6 usuarios para 2, 4 y 6 segundos de tamaño de segmento

En la figura 29 se observa el ancho de banda del resto de tamaños de segmento. Se puede apreciar que el ancho de banda que utilizan estos vídeos es el mismo que en el caso anterior, pero al tardar más tiempo en decidir cambiar de calidad, sólo realizan un cambio, manteniéndose en la calidad media y permitiendo ver el vídeo de forma fluida y sin errores.

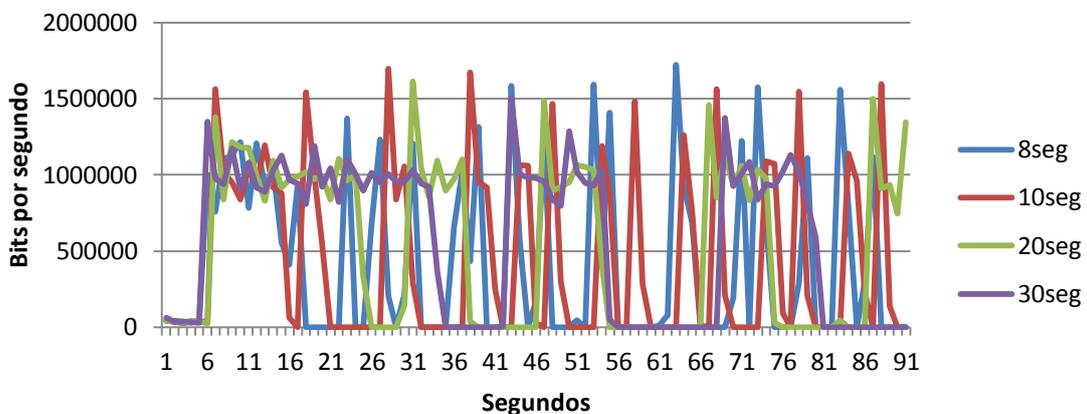


Figura 29: Ancho de banda con 6 usuarios y tamaño de segmento de 8, 10, 20 y 30 segundos

5.4 Pruebas con red inalámbrica en entorno controlado

Para las pruebas realizadas con una red inalámbrica se ha empleado la topología de la figura 30. En este caso, el servidor está conectado al punto de acceso inalámbrico mediante un cable. El cliente y los seis usuarios que se intercambian información están conectados al punto de acceso mediante WIFI, lo cual se muestra en la figura 30 con una línea naranja.

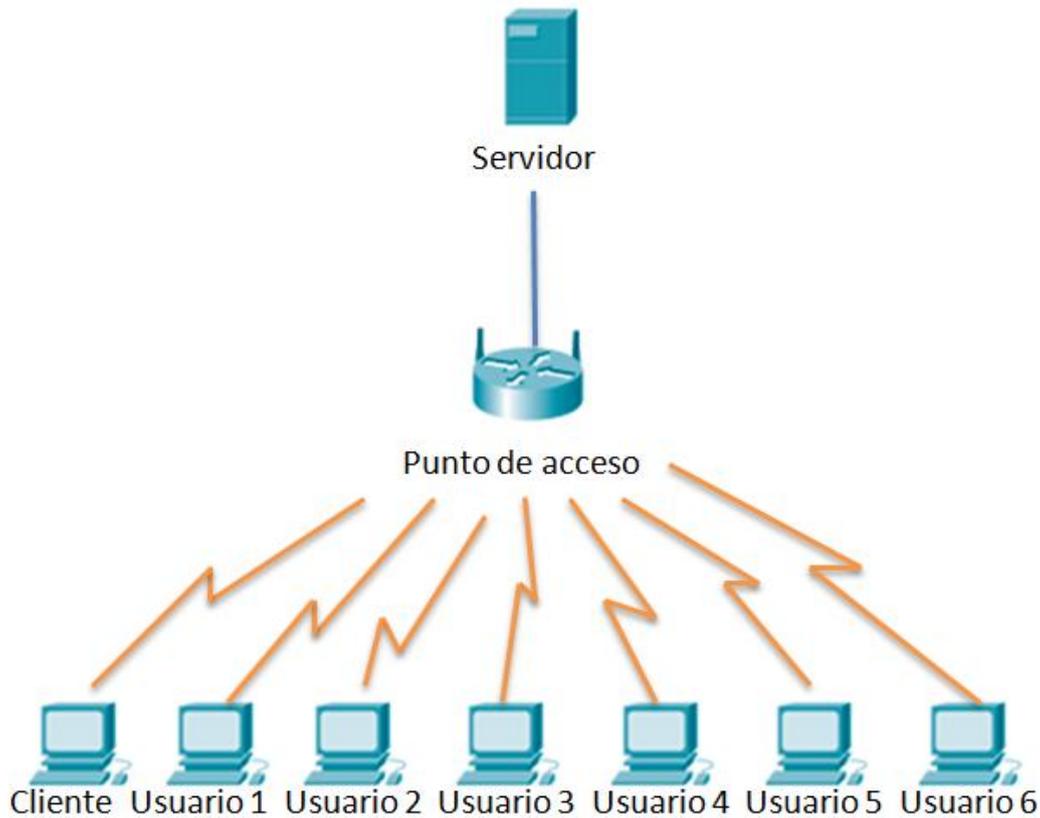


Figura 30: Topología de la red inalámbrica

Con la red inalámbrica se han hecho pruebas a diferentes bitrates.

5.4.1 Caso con 54 Mbps

En este caso se ha configurado el router para que permita un bitrate máximo de 54 Mbps, el cual se corresponde con el estándar 802.11g, presente en la mayoría de los routers que se utilizan hoy en día en los hogares.

Al igual que en la red cableada, se han ido añadiendo usuarios, hasta un máximo de 6 usuarios, que se intercambian información con un ancho de banda de 2 Mbps. En la figura 31 se muestra el tiempo que tarda el vídeo en alcanzar la calidad a partir de la cual no vuelve a cambiar. Al igual que en la red cableada, para el tamaño de segmento de 30 segundos aparece en el caso de 0 y 2 usuarios que el tiempo que tarda en alcanzar la estabilidad es menor al de 20 segundos. Esto es debido a que el vídeo con el tamaño de segmento de 30 segundos no alcanza la mayor calidad. Con 4 usuarios el vídeo con el tamaño de segmento de 2 segundos deja de ser estable, y con 6 usuarios, la inestabilidad se extiende hasta el vídeo de tamaño de segmento de 8 segundos.

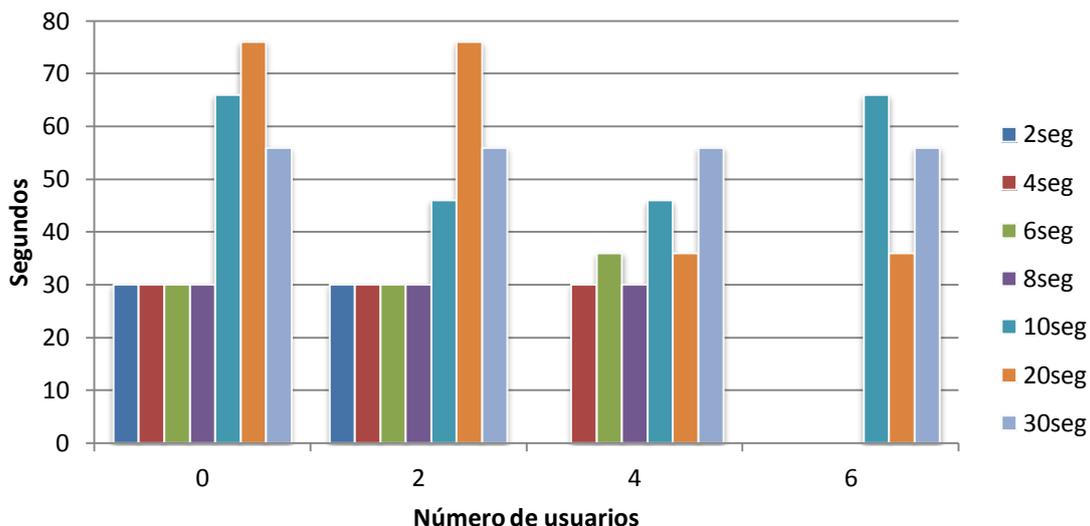


Figura 31: Tiempo de estabilidad para 54 Mbps

En la figura 32 se muestra el número de saltos de calidad que se producen. Si se compara con la figura 31 se aprecia que los vídeos con mayor cantidad de saltos coinciden con los vídeos inestables. En el caso con 6 usuarios, el vídeo de 4 segundos de tamaño de segmento sólo hace un cambio de calidad, pero se para, lo que hace que no sea estable y, por tanto, no sea apto para su visualización.

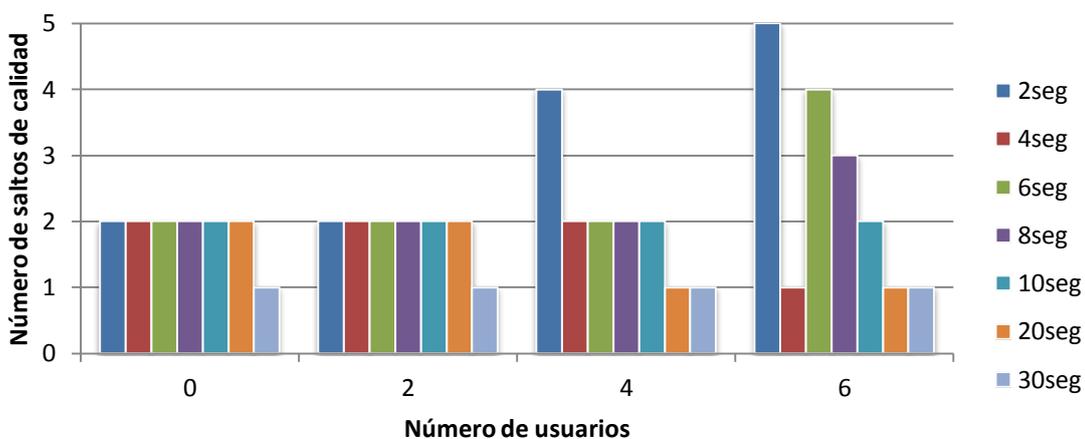


Figura 32: Número de saltos de calidad en red inalámbrica a 54 Mbps

En la figura 33 se muestra la calidad máxima que alcanzan los vídeos. En el caso con 6 usuarios se aprecia que la mayoría de los vídeos inestables alcanzan la máxima calidad, lo cual es una de las razones por las que son inestables, ya que seleccionando una calidad de vídeo menor, los vídeos podrían continuar reproduciéndose sin errores.

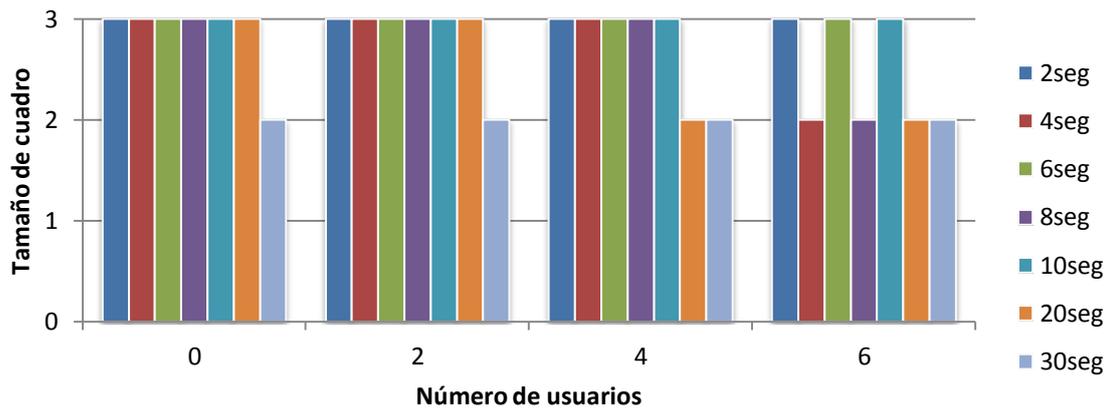


Figura 33: Máxima calidad alcanzada en red inalámbrica a 54 Mbps

En la figura 34 se muestra el ancho de banda consumido con 0 usuarios intercambiando información, que alcanza valores de 26 Mbps. Se observa que los picos de ancho de banda suceden en el mismo momento. Los picos de mayor tamaño se corresponden con el tráfico de vídeo, mientras que los picos más pequeños se corresponden con el de audio.

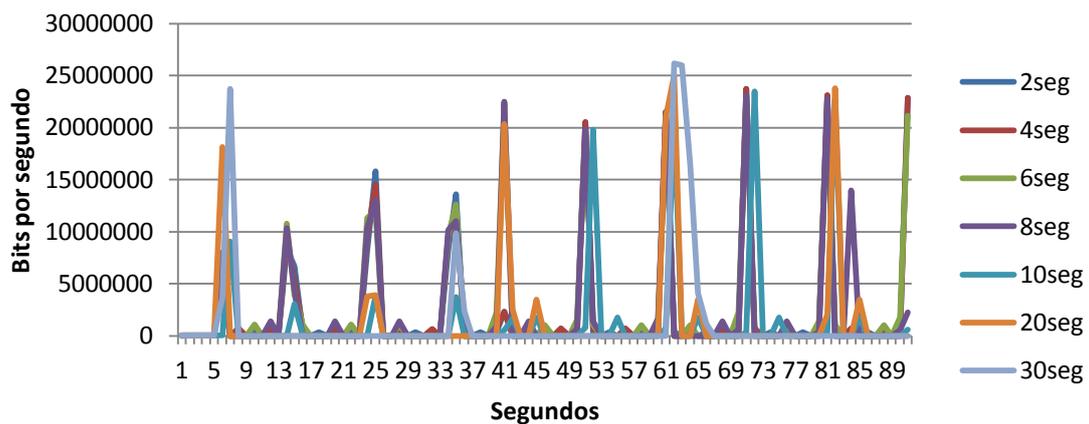


Figura 34: Ancho de banda con 0 usuarios para la red inalámbrica a 54 Mbps

En la figura 35 se muestra el ancho de banda consumido con 2 usuarios intercambiándose información. Se llegan a alcanzar valores de 16 Mbps. En este caso no se produce ningún fallo en la visualización de los vídeos.

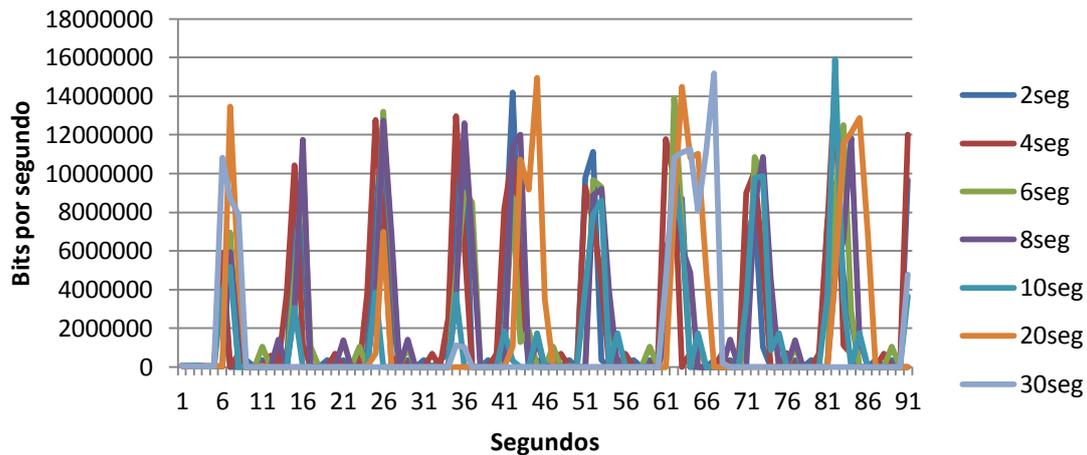


Figura 35: Ancho de banda con 2 usuarios en red inalámbrica de 54 Mbps

En la figura 36 se muestra el ancho de banda consumido con 4 usuarios intercambiando información. Se llega a alcanzar un pico de 10 Mbps pero la mayoría del tráfico oscila entre los 2 y los 6 Mbps. Con 4 usuarios, el vídeo de tamaño de segmento de 2 segundos ya no es estable y se para al cambiar de calidad. En comparación con la red cableada, con 4 usuarios en la red inalámbrica a 54 Mbps el ancho de banda es más inestable y se encuentra el primer caso de un vídeo con inestabilidad.

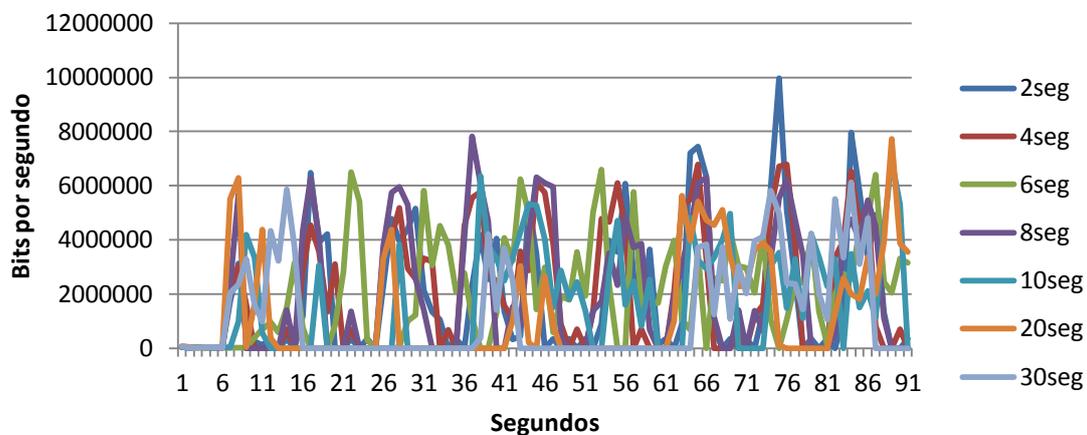


Figura 36: Ancho de banda con 4 usuarios en red inalámbrica a 54 Mbps

En la figura 37 se muestra el ancho de banda consumido al transmitir el vídeo mientras otros 6 usuarios intercambian información. En este caso se comprueba que el ancho de banda sigue manteniéndose inestable, esta vez con valores entre 1 y 4 Mbps. La inestabilidad en la reproducción de los vídeos se extiende hasta el vídeo con tamaño de segmento de 8 segundos. Sin embargo, hay una diferencia entre el vídeo con tamaño de segmento de 8 segundos y los vídeos con tamaño de segmento comprendido entre 2 y 6 segundos. En el de 8 segundos, a pesar de no ser estable, los cambios de calidad ocurren sin errores, permitiendo una visualización fluida del contenido, a pesar de que los cambios continuos de calidad puedan resultar desconcertantes para el usuario. El hecho de que la calidad máxima que alcance se

corresponda con 1024x576 tiene una gran influencia en la ausencia de errores. En los tres vídeos con tamaño de segmento menor al de 8 segundos se producen errores, por lo que no son aptos para su visualización.

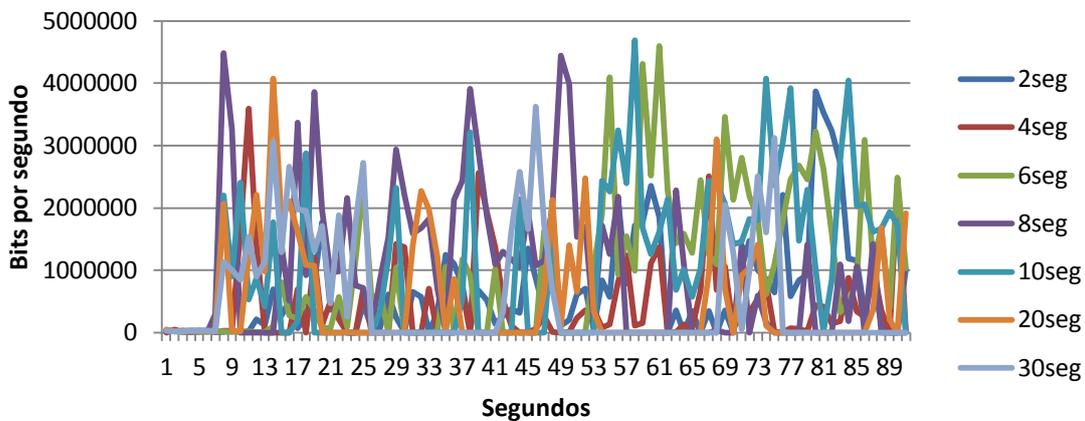


Figura 37: Ancho de banda con 6 usuarios en red inalámbrica a 54 Mbps

5.4.2 Caso a 11Mbps

En este caso se emplea la misma topología, pero se ha configurado el router para que el bitrate máximo sea de 11Mbps, lo que se corresponde al estándar WIFI 802.11n, el cual se emplea conjuntamente con 802.11g en la mayoría de los routers empleados en los hogares.

A diferencia del caso de la red cableada y el de la red inalámbrica a 54 Mbps, el tráfico que se intercambian los usuarios es de 1 Mbps. De esta forma se intenta estudiar más detalladamente las situaciones con menor ancho de banda.

En la figura 38 se muestra el tiempo que requieren los vídeos para mantenerse en una calidad sin que se produzcan cambios. En los casos con 4 y 6 usuarios el ancho de banda disponible es menor que en las situaciones anteriores, lo que se refleja en el número de vídeos inestables.

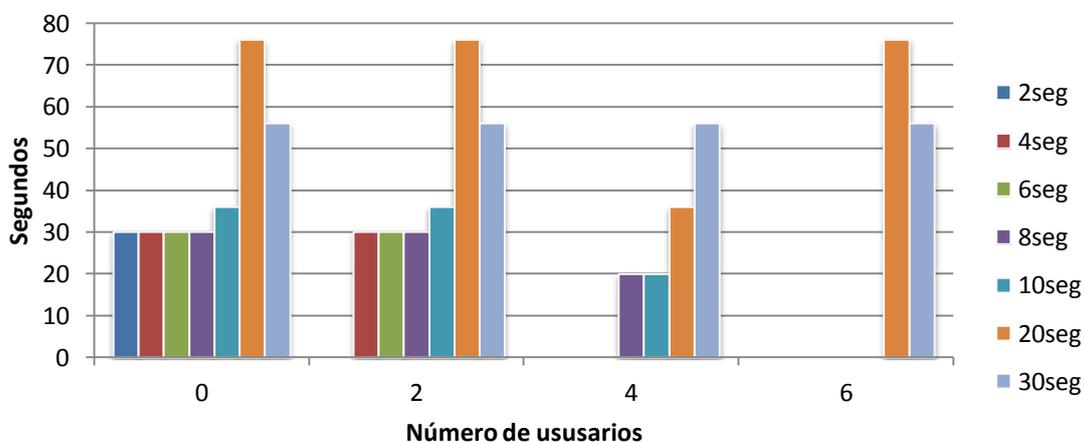


Figura 38: Tiempo de estabilidad en red inalámbrica a 11 Mbps

En la figura 39 se muestra el número de cambios de calidad que se han producido. Se han detectado situaciones muy inestables donde se han acumulado hasta 7 cambios de calidad. Esto ocurre con 4 usuarios.

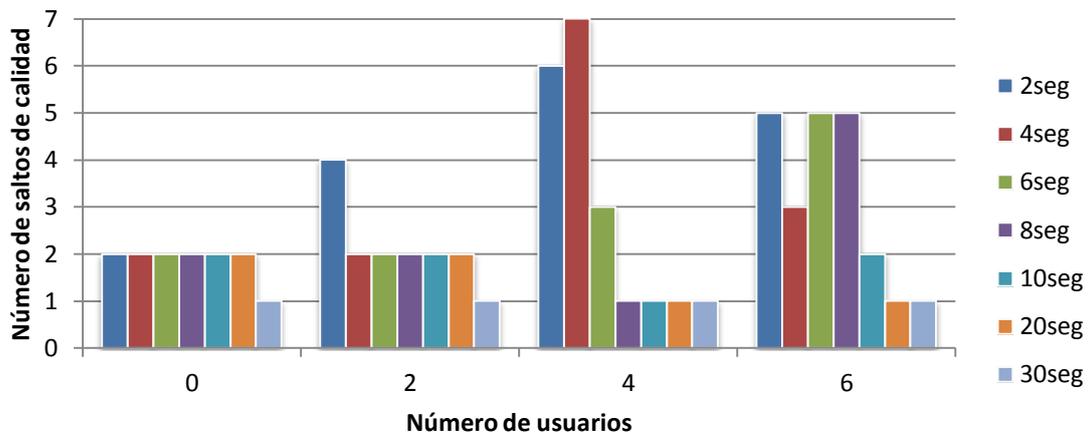


Figura 39: Número de cambios de calidad en red inalámbrica a 11 Mbps

En la figura 40 se muestra la calidad máxima que alcanzan los vídeos. Se puede comprobar que con 4 y 6 usuarios, los vídeos más estables son los que no alcanzan la calidad máxima.

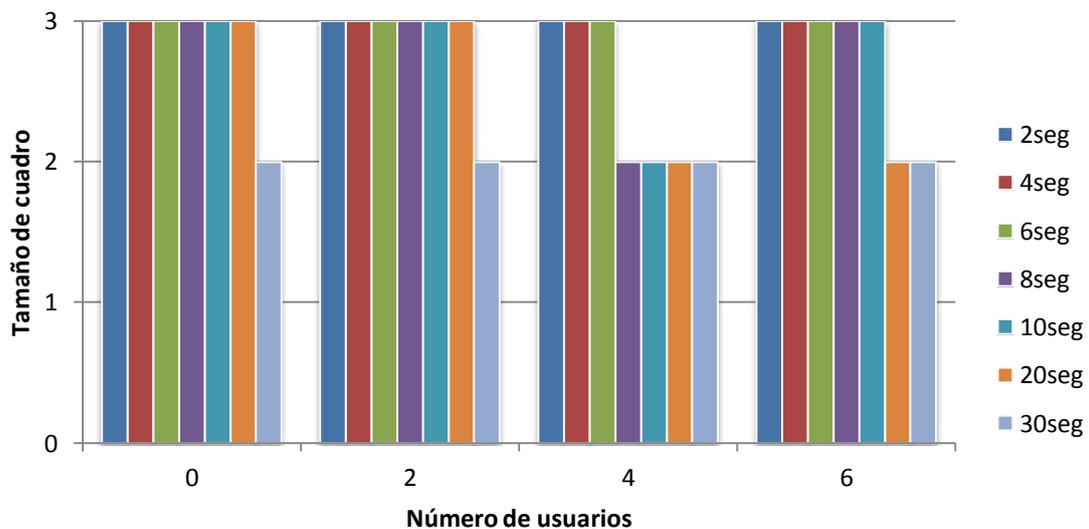


Figura 40: Máxima calidad alcanzada en red inalámbrica a 11 Mbps

En la figura 41 se muestra el ancho de banda utilizado cuando se transmitía el vídeo mientras ningún otro usuario intercambiaba información. Se observa que se alcanzan valores entre 6 y 7 Mbps. En esta situación todos los vídeos se reproducen correctamente.

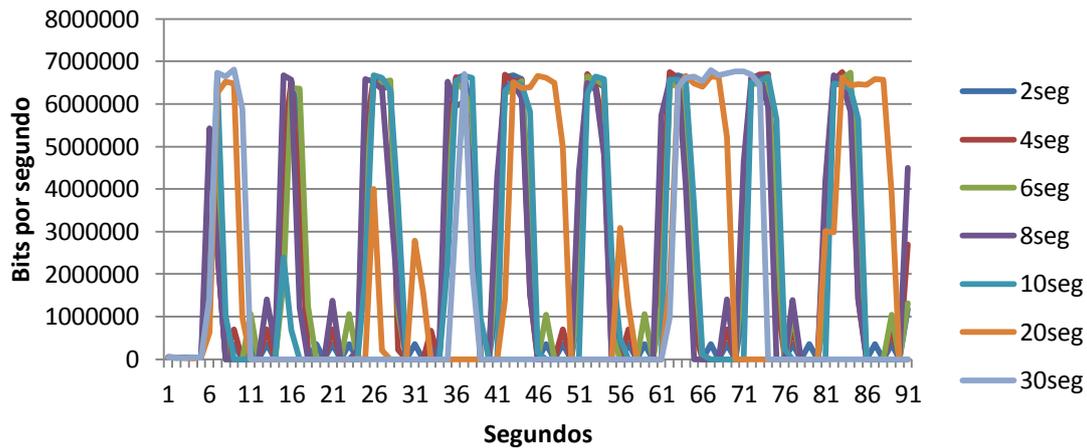


Figura 41: Ancho de banda con 0 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps

En la figura 42 se muestra el ancho de banda que se ha utilizado mientras 2 usuarios se intercambiaban información. Se alcanzan picos de 5,5 Mbps pero la mayoría del tráfico oscila entre 2 y 4 Mbps. En esta situación, todos los vídeos se reproducen sin errores excepto el de tamaño de segmento de 2 segundos, el cual tiene fallos en el audio y el vídeo se para al cambiar de calidad.

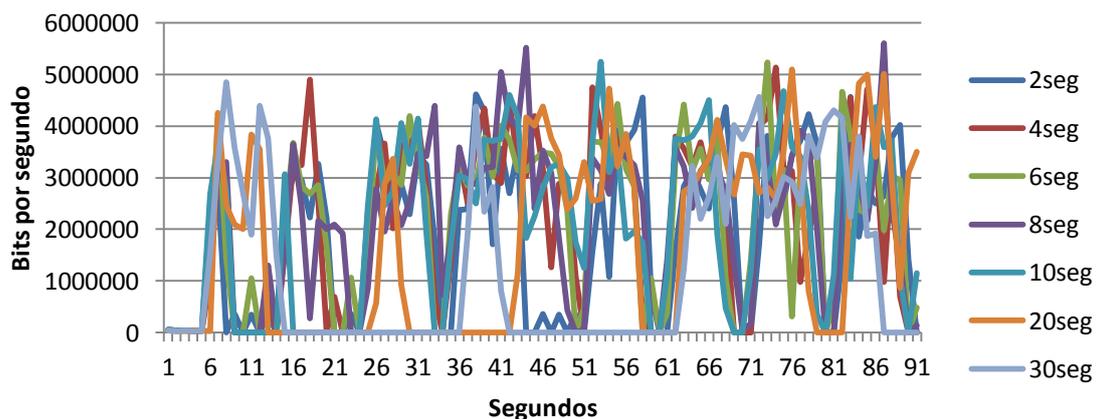


Figura 42: Ancho de banda con 2 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps

En la figura 43 se muestra el ancho de banda utilizado con 4 usuarios intercambiando información. Se alcanzan picos de 3 Mbps pero la mayoría del tráfico oscila entre 1 y 2 Mbps. En este caso falla el audio y se para el vídeo en los tamaños de segmento entre 2 y 6 segundos. También se produce un flash negro en el vídeo con tamaño de segmento de 10 segundos. Este error es más común en los cambios de calidad, pero en algún caso ocurre mientras se reproduce el vídeo. Tiene una duración inferior a un segundo y el vídeo y el audio mantienen la sincronía. Visualmente se corresponde con lo mostrado en la figura 44.

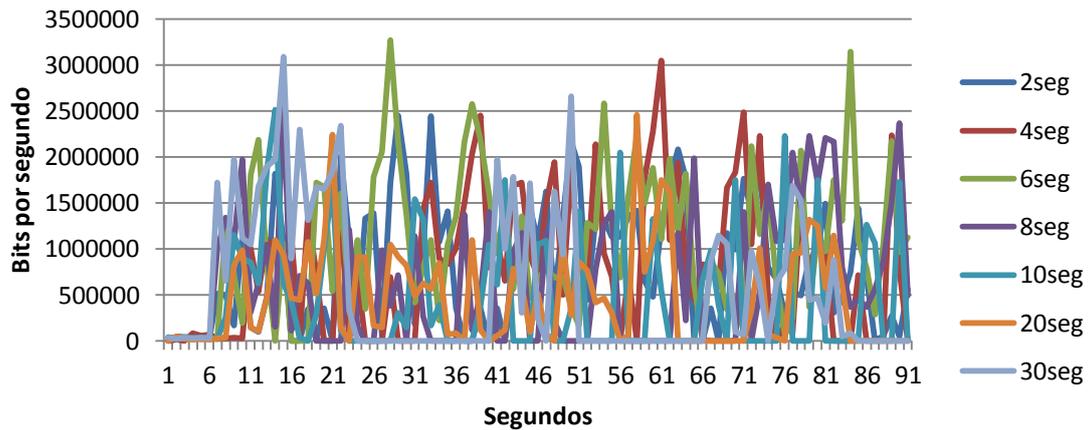


Figura 43: Ancho de banda con 4 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps

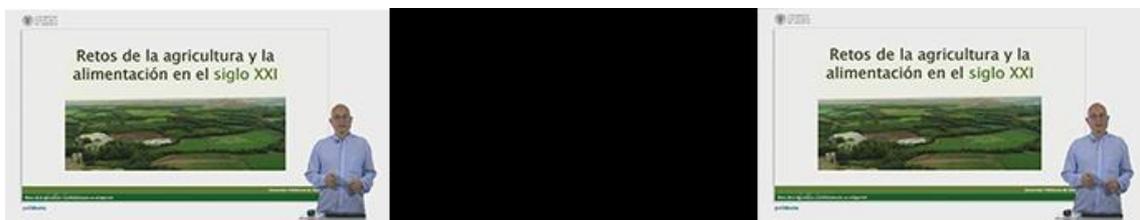


Figura 44: Error de flash negro

En la figura 45 se muestra el ancho de banda utilizado para transmitir el vídeo mientras 6 usuarios intercambian información. Se alcanzan picos de 3 Mbps pero la mayoría del tráfico oscila entre 0,5 y 2 Mbps. En este caso se produce inestabilidad en los vídeos con tamaño de segmento entre 2 y 10 segundos, causando que el audio y el vídeo se paren y la imagen se quede en negro mientras intenta bajar de calidad. En este caso se vuelve a producir un flash a negro en el vídeo con tamaño de segmento de 20 segundos.

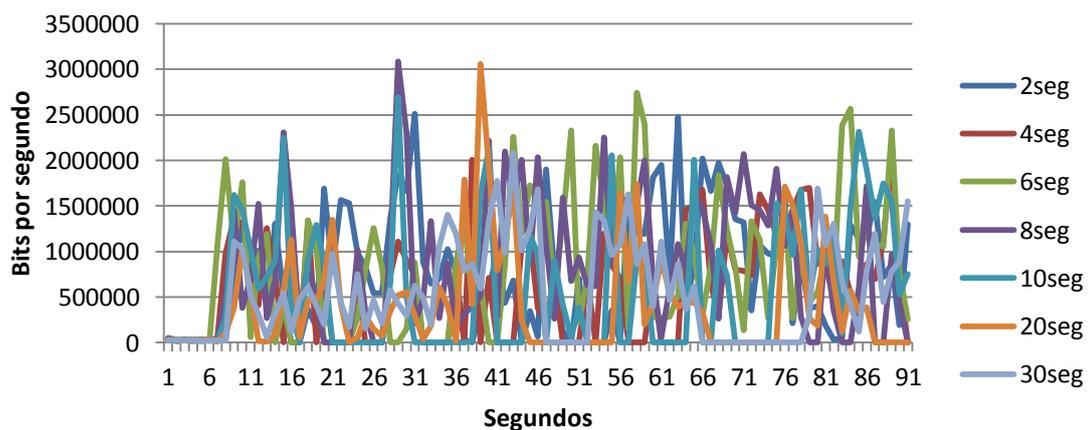


Figura 45: Ancho de banda con 6 usuarios en red inalámbrica a 11 Mbps

5.4.3 Caso a 1 y 2 Mbps

Se han realizado pruebas limitando el ancho de banda del punto de acceso a 1 y 2Mbps. En la figura 46 se muestra el tiempo necesario para alcanzar la estabilidad. Para ambos casos se ha obtenido el mismo resultado. La calidad máxima alcanzada por todos los vídeos ha sido de 1024x576. Se ha probado a introducir tráfico para detectar el límite de ancho de banda aceptable. Con 0 y 2 usuarios todos los vídeos se mantienen estables tanto a 1 como a 2 Mbps. A continuación se explica detalladamente las condiciones en las que se han realizado estas pruebas.

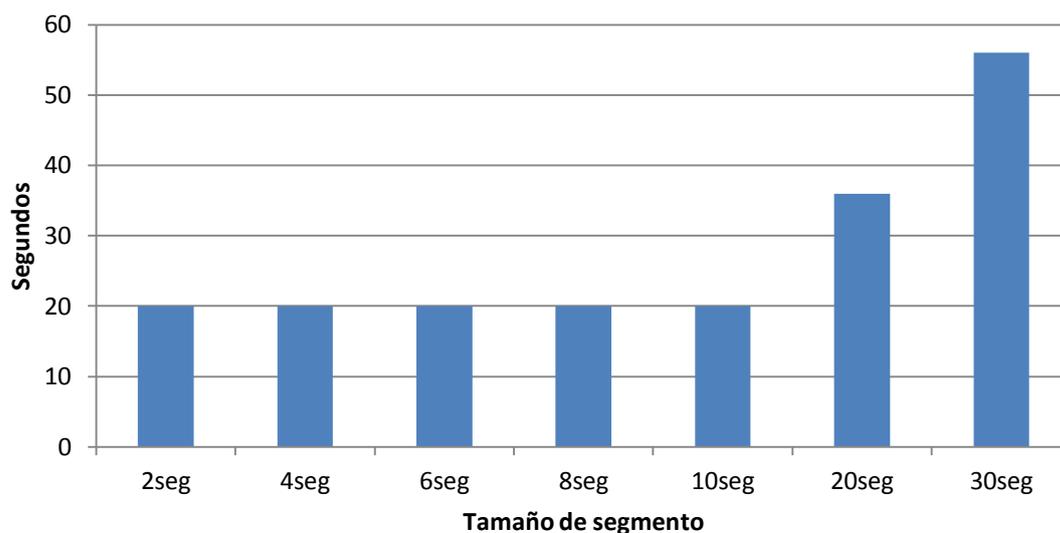


Figura 46: Tiempo de estabilidad en red inalámbrica a 1 y 2Mbps

A pesar de que el ancho de banda que se ha establecido es muy pequeño, con 2 Mbps se ha probado a introducir tráfico a 200 Kbps con 2 y 4 usuarios. Con 4 usuarios el vídeo no lograba comenzar a reproducirse. Con 2 usuarios el resultado es exactamente igual que sin ningún usuario, pero en el vídeo con 30 segundos de tamaño de segmento se observa un flash a negro. En la figura 47 se muestra el ancho de banda requerido por el vídeo con tamaño de segmento de 2 segundos para 0, 2 y 4 usuarios intercambiando contenido de 200 Kbps. Como se puede observar, el ancho de banda con 0 y 2 usuarios apenas varía, situándose entre 1 y 1,5 Mbps. Por esa razón los resultados dan iguales. Con 4 usuarios el ancho de banda baja de 1 Mbps y el vídeo ya no se puede visualizar.

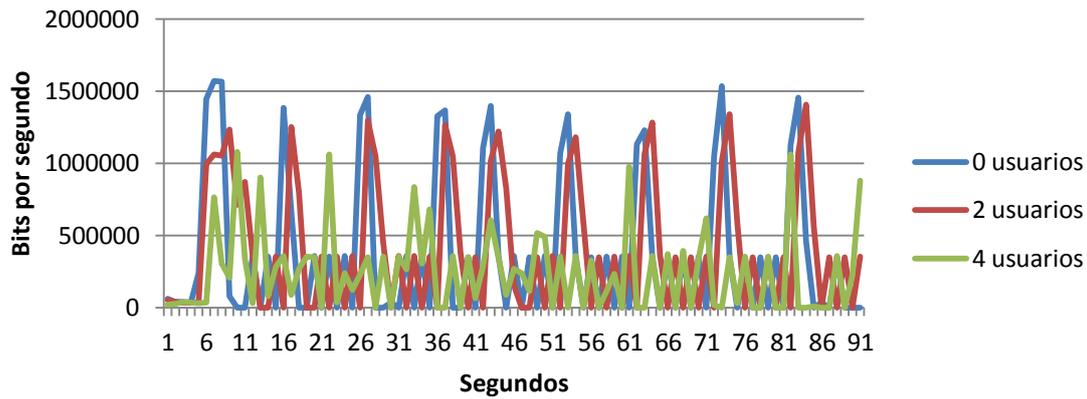


Figura 47: Ancho de banda en red inalámbrica a 2 Mbps para 0, 2 y 4 usuarios

Con el punto de acceso restringido a 1 Mbps, se ha introducido tráfico 100 Kbps. Es una cantidad muy pequeña pero la intención es encontrar el límite para el buen funcionamiento de MPEG DASH. Como se ha dicho anteriormente el tiempo de estabilidad y la calidad máxima coincide con el caso a 2 Mbps. También se mantiene que con 0 y 2 usuarios todos los vídeos son estables, aunque con 2 usuarios, en el vídeo de tamaño de segmento de 6 segundos, se produce un flash a negro. Que la estabilidad se mantenga con 0 y 2 usuarios es normal ya que apenas cambia el ancho de banda, como se aprecia en la figura 48. El ancho de banda mostrado corresponde al vídeo de tamaño de segmento de 4 segundos.

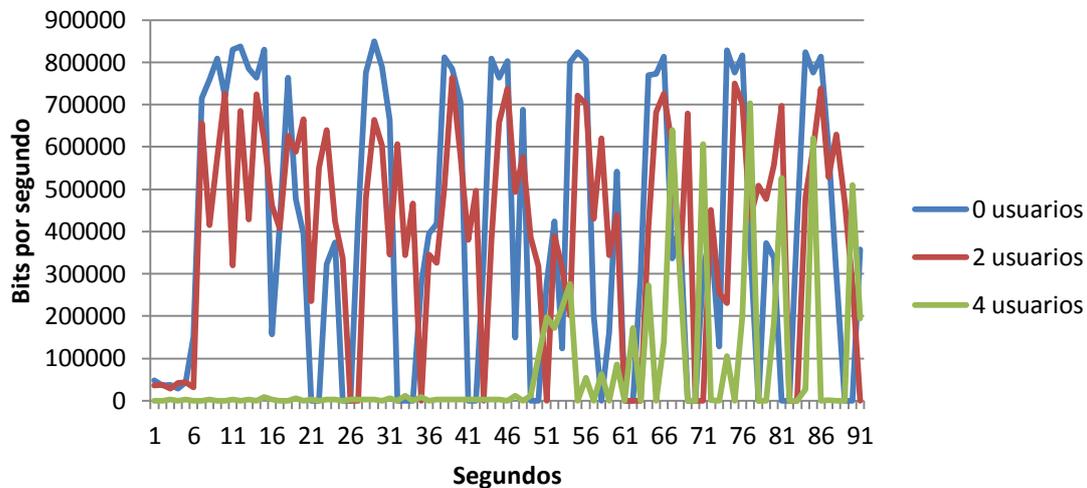


Figura 48: Ancho de banda en red inalámbrica a 1 Mbps con 0, 2 y 4 usuarios

En este caso, con 4 usuarios, el vídeo con tamaño de segmento de 4 segundos intenta reproducirse tras un largo periodo de tiempo, pero al no lograrlo, aparece un error en el vídeo, mostrado en la figura 49. Esto ocurre porque no hay peores calidades disponibles, y al no poder bajar de calidad, el vídeo comienza a tener errores típicos de otros métodos de transmisión de vídeo. En este caso la imagen está pixelada y con errores de crominancia.

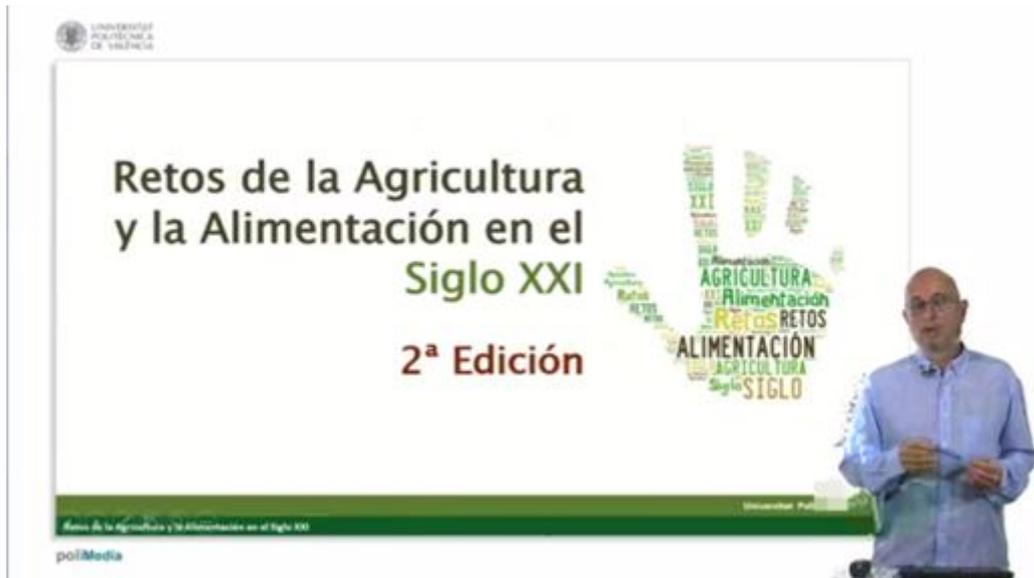


Figura 49: Error en el vídeo

Como se puede comprobar, el desempeño de MPEG DASH a bajos anchos de banda es bueno. Actualmente la mayoría de los posibles usuarios de la plataforma Polimedia disponen de conexiones a internet con mayor ancho de banda que el que se muestra en las figuras anteriores, por lo que siempre alcanzarán la calidad máxima.

5.5 Pruebas en entorno real

Se han realizado pruebas en un entorno real para comprobar su funcionamiento tal cual lo vería un usuario típico de Polimedia. El servidor empleado ha sido el que se ha establecido en la máquina virtual Ubuntu, tal como se ha descrito en el capítulo 4. Este servidor se encuentra en el campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia y se accede a él a través de una VPN. El cliente ha sido un ordenador portátil con procesador i3, 4Gb de RAM y sistema operativo de 64 bits.

En la figura 50 se muestra el momento en el que se produce el cambio de calidad para cada vídeo. Se puede observar que los vídeos con tamaño de segmento entre 2 y 8 se comportan igual, también ocurre esto con los vídeos con tamaño de segmento entre 10 y 19 segundos y con los que están entre 20 y 29 segundos. De esta forma, visualmente se pueden diferenciar 4 casos.

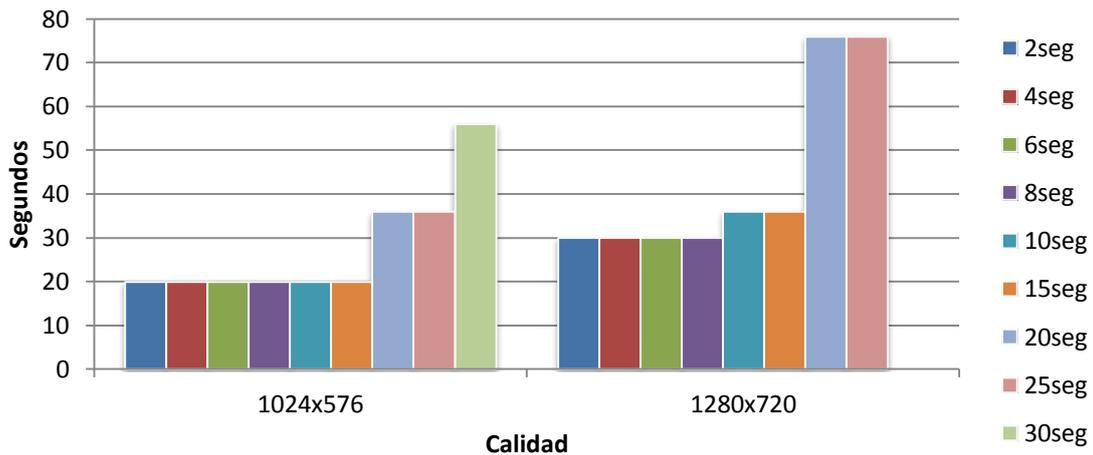


Figura 50: Tiempo de cambio de calidad

En la figura 51 se aprecia el ancho de banda utilizado por los vídeos de los tamaños de segmento comprendidos entre 2 y 8 segundos. Se puede comprobar que los picos de tráfico de vídeo ocurren en el mismo momento. Los cambios de calidad se producen en los momentos indicados por los puntos. El punto azul marca el cambio de un tamaño de cuadro de 640x360 a 1024x576 en el segundo 20, y el punto rojo marca el cambio de un tamaño de cuadro de 1024x576 a 1280x720 en el segundo 30. Se aprecia como los picos de ancho de banda marcados por los puntos van aumentando conforme aumenta la calidad del vídeo. Como se puede ver, el ancho de banda que utiliza el vídeo supera brevemente los 10 Mbps.

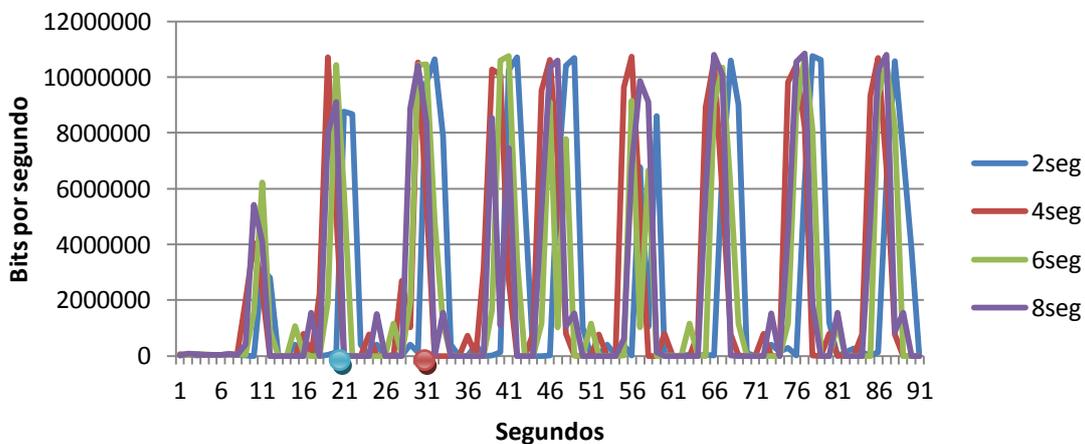


Figura 51: Ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento entre 2 y 8 segundos

En la figura 52 se muestra el ancho de banda utilizado por los vídeos con tamaño de segmento de 10 y 15 segundos. Aquí también se observa que los picos de ancho de banda, los cuales alcanzan valores de 10 Mbps al igual que en los vídeos anteriores, coinciden. El punto azul marca el cambio de un tamaño de cuadro de 640x360 a 1024x576 en el segundo 20, y el punto rojo marca el cambio de un tamaño de cuadro de 1024x576 a 1280x720 en el segundo 36.

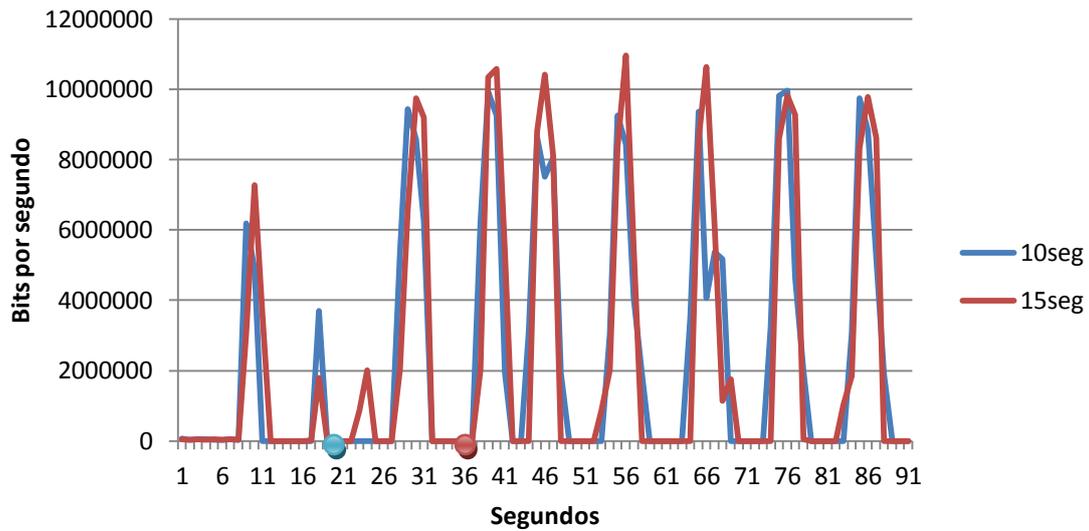


Figura 52: ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento de 10 y 15 segundos

En la figura 53 se muestra el ancho de banda utilizado por los vídeos con tamaño de segmento de 20 y 25 segundos. Al igual que en los dos casos anteriores el ancho de banda supera brevemente los 10 Mbps. En este caso los picos de tráfico están más espaciados que en los casos anteriores. El punto azul marca el cambio de un tamaño de cuadro de 640x360 a 1024x576 en el segundo 36, y el punto rojo marca el cambio de un tamaño de cuadro de 1024x576 a 1280x720 en el segundo 76.

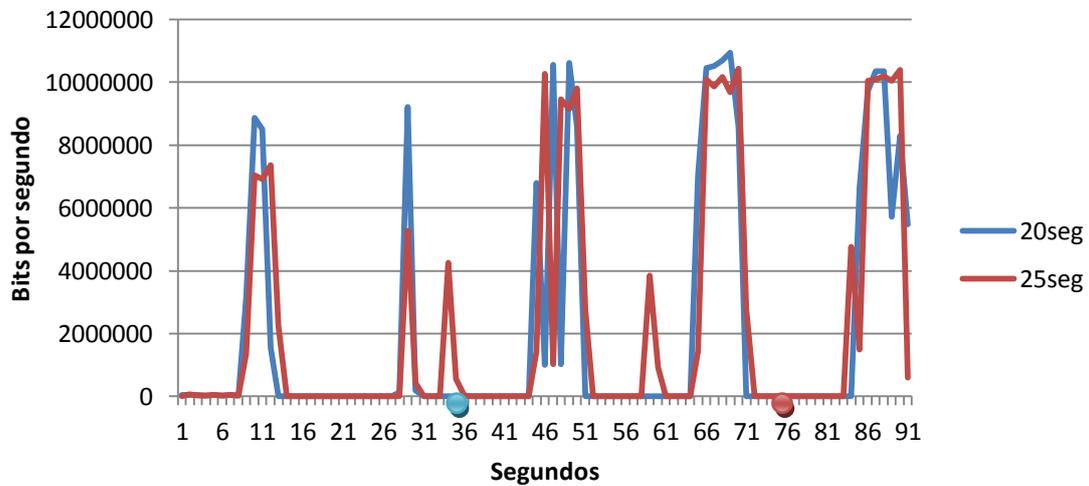


Figura 53: Ancho de banda para vídeos con tamaño de segmento de 20 y 25 segundos

Por último, en la figura 54 se muestra el ancho de banda utilizado por el vídeo con el tamaño de segmento de 30 segundos. Se observa que se alcanzan los 10 Mbps tras subir de calidad de 640x360 a 1024x576, indicado por el punto rojo. También se aprecia que los picos de ancho de banda están más separados en el tiempo.

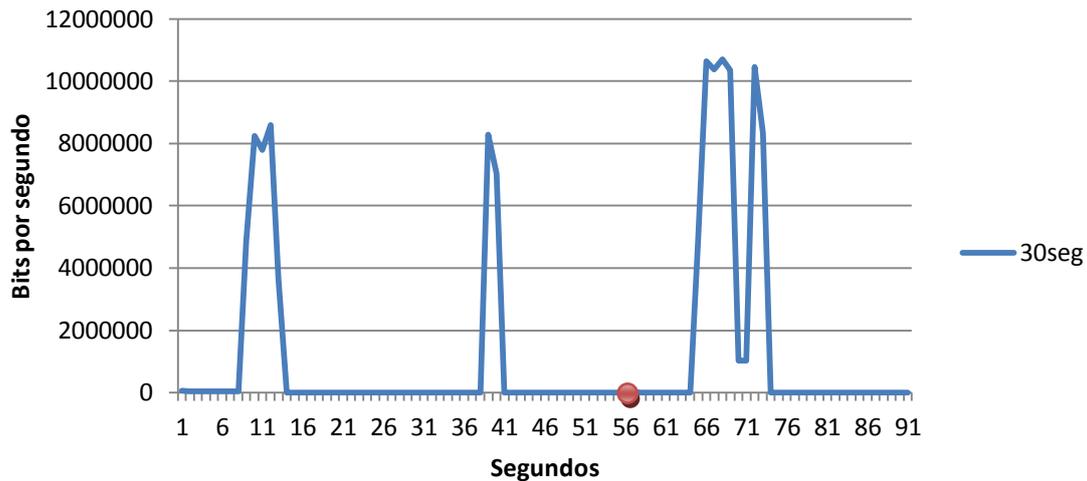


Figura 54: Ancho de banda empleado por el vídeo con tamaño de segmento de 30 segundos

Tras estudiar estas gráficas se concluye que la variación de los tamaños de segmentos sólo se diferencia visualmente en tamaños de segmento que guarden una distancia de 10 segundos. Por ello, para estudiar el efecto que produce el tamaño de segmento en la calidad de experiencia del vídeo, debido a que el vídeo comienza con la menor calidad, se ha seleccionado un vídeo de cada uno de los conjuntos anteriores para realizar el estudio subjetivo. Una vez que se alcanza el mayor nivel de calidad, se mantiene hasta finalizar el vídeo.

5.6 Estudio subjetivo de la calidad de experiencia

Para realizar el estudio subjetivo de la calidad de experiencia, se han seleccionado cuatro vídeos con diferentes tamaños de segmento, cada uno perteneciente a un intervalo distinto: de 1 a 9 segundos, de 10 a 19 segundos, de 20 a 29 segundos y mayor de 30.

La evaluación se ha realizado según MOS mediante el método Double Stimulus Impairment Scale, en el que se muestra primero el vídeo de referencia, en este caso el vídeo a la mejor calidad (1280x720), y después el vídeo que se quiere estudiar, correspondiéndose a los cuatro casos con variación de calidad.

En la figura 55 se muestra el formulario que se ha empleado para evaluar la calidad de experiencia. En este formulario, los evaluadores deben indicar su edad, sexo y grado de conocimiento de tecnologías de streaming adaptativo. A continuación aparece una breve explicación del proceso que se va a seguir y, por último, las tablas donde el evaluador debe marcar con una "X" la casilla que se corresponda al nivel de calidad que crea correspondiente. El valor 1 se corresponde con la peor calidad y el valor 5 con la mayor, que se equivaldría al vídeo de referencia.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE EXPERIENCIA

Edad

Sexo

Grado de conocimiento de MPEG-DASH, experiencia con otros estándares de transmisión adaptativos

Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo

A continuación se le mostrará el vídeo de referencia y, seguidamente se le mostrará el vídeo a evaluar. Al finalizar la visualización del vídeo, marque con una X la casilla con la valoración que crea oportuna.

CASO 1

Valor	Calidad visual	Evaluación
5	Excelente	
4	Buena	
3	Razonable	
2	Pobre	
1	Mala	

CASO 2

Valor	Calidad visual	Evaluación
5	Excelente	
4	Buena	
3	Razonable	
2	Pobre	
1	Mala	

CASO 3

Valor	Calidad visual	Evaluación
5	Excelente	
4	Buena	
3	Razonable	
2	Pobre	
1	Mala	

Figura 55: Formulario de evaluación de calidad de experiencia

En la tabla 6 se muestra el perfil de los evaluadores según las características comentadas anteriormente.

Edad				
Intervalos	20-29	30-39	40-49	50-59
Número de evaluadores	8	1	0	2
Sexo				
	Hombre			Mujer
Número de evaluadores	5			6
Grado de conocimiento de MPEG DASH				
Muy alto	0			
Alto	1			
Medio	0			
Bajo	4			
Muy bajo	5			

Tabla 6: Perfil de los evaluadores

A continuación se muestran los resultados de la evaluación subjetiva.

5.6.1 Caso 1: Tamaño de segmento de 1 a 9 segundos

En la figura 56 se muestra el resultado de la evaluación subjetiva del caso 1. La mayoría de los evaluadores le da una calificación buena al vídeo. El tiempo que el vídeo permanece en baja calidad (640x360) y las características de los vídeos de Polimedia ayuda a que la pérdida de calidad de experiencia no sea excesiva, aunque un evaluador ha considerado que la calidad de experiencia está por debajo de la aceptable.



Figura 56: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 1 a 9 segundos

5.6.2 Caso 2: Tamaño de segmento de 10 a 19 segundos

En la figura 57 se muestra el resultado de la evaluación subjetiva del caso 2. En este caso, la mayoría de los evaluadores califican la calidad de experiencia como buena. Esto se debe a los resultados vistos anteriormente en las gráficas. El cambio de calidad de vídeo de 640x360 a 1024x576 se produce en el mismo segundo que en el caso anterior, por lo que la calidad de experiencia resulta similar al caso 1. El tiempo durante el cual se muestra la calidad de vídeo media (1024x576) es mayor que el caso anterior, por lo que algunos evaluadores han percibido la calidad de experiencia como razonable o pobre.

10 -19 segundos

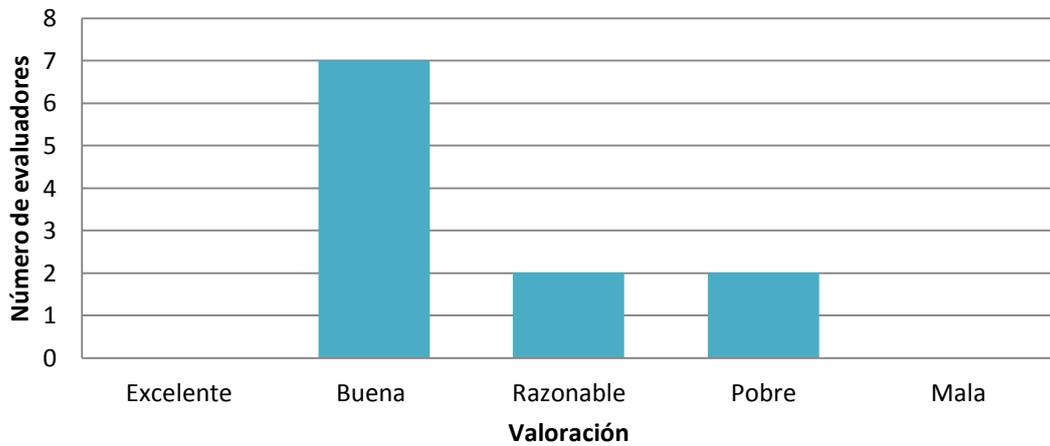


Figura 57: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 10 a 19 segundos

5.6.3 Caso 3: Tamaño de segmento de 20 a 29 segundos

En la figura 58 se muestra el resultado de la evaluación subjetiva del caso 3. Como se puede comprobar en las gráficas comentadas anteriormente, el primer salto de calidad de vídeo que tiene lugar en este intervalo está retrasado con respecto a los casos 1 y 2, lo que resulta en una calidad de experiencia menor, evaluada como razonable por la mayoría de los participantes.

20 -29 segundos

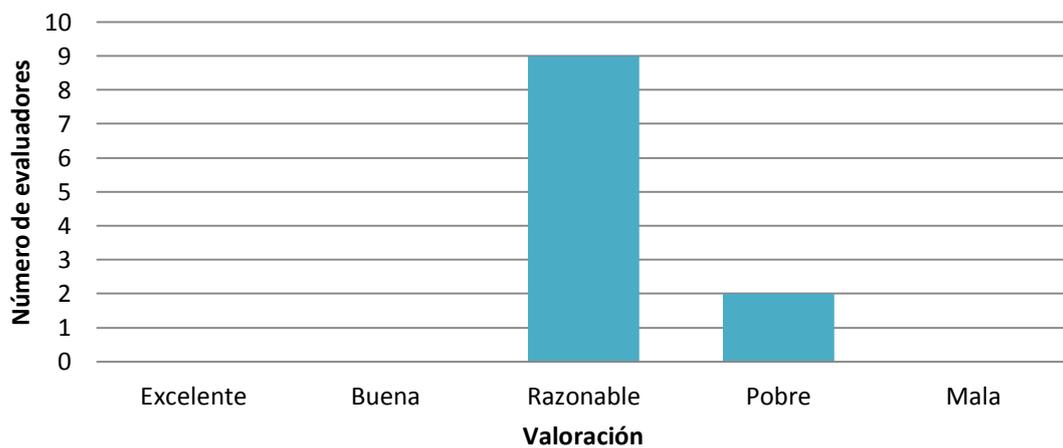


Figura 58: Evaluación subjetiva de los tamaños de segmento de 20 a 29 segundos

5.6.4 Caso 4: Tamaño de segmento de 30 segundos

En la figura 59 se muestra la evaluación subjetiva del caso 4. En este caso la mayoría de los evaluadores califica la calidad de experiencia de pobre, seguido de cerca por el valor razonable y el valor de calidad de experiencia mala. El primer salto de calidad de vídeo tiene lugar aproximadamente en el minuto 1 del vídeo. Dado que los vídeos empleados en Polimedia y otras plataformas de e-learning comienzan con una introducción del contenido en la que no hay muchos cambios en la imagen, la calidad de experiencia puede verse menos comprometida que en vídeos de otras características.

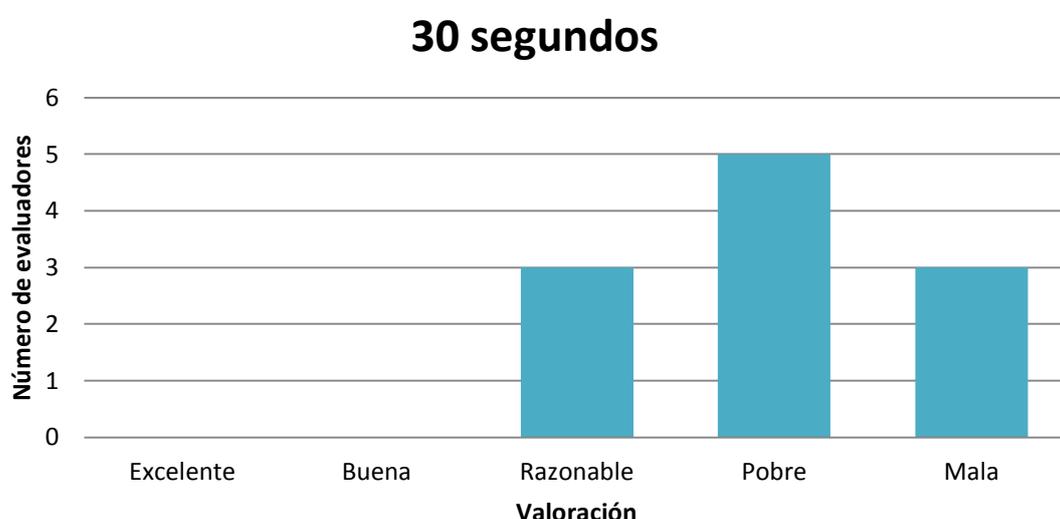


Figura 59: Evaluación subjetiva del tamaño de segmento de 30 segundos

Se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) con los datos obtenidos de las pruebas subjetivas. El resultado es el que se muestra en la tabla 7. La razón-F es el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Como el valor P es menor que 0,05, se determina que existe diferencia estadística entre los datos obtenidos.

Razón-F	Valor-P
11.65	0.0000

Tabla 7: ANOVA de los resultados de las pruebas subjetivas

A partir de lo obtenido en el ANOVA se determina que se pueden realizar pruebas de múltiples rangos. Con ello obtenemos la media de las evaluaciones y la similitud entre cada caso. En la tabla 8 y la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos. La tabla 8 muestra la media de cada caso, la cual está representada gráficamente en la figura 60. Se puede comprobar que únicamente los casos 1 y 2 superan la estimación razonable de la calidad.

Casos	Evaluaciones	Media	Grupos Homogéneos
4	11	2.0	X
3	11	2.81818	X
2	11	3.45455	XX
1	11	3.81818	X

Tabla 8: Media de los resultados de las pruebas subjetivas

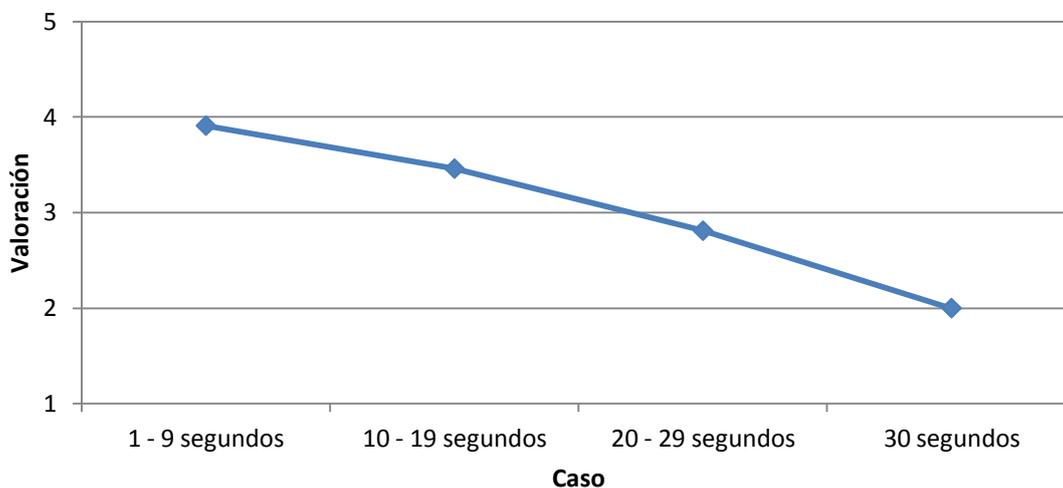


Figura 60: Valoración media de la calidad de experiencia

En la tabla 9 se aprecia la diferencia que existe al comparar los casos unos con otros. Los que están marcados con un asterisco se corresponden con las comparaciones con una diferencia significativa.

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0.363636	0.667541
1 - 3	*	1.0	0.667541
1 - 4	*	1.81818	0.667541
2 - 3		0.636364	0.667541
2 - 4	*	1.45455	0.667541
3 - 4	*	0.818182	0.667541

Tabla 9: Diferencia entre cada caso

5.7 Aspectos molestos para el usuario y recomendaciones

Tras la evaluación de la calidad de experiencia se preguntó a los usuarios qué aspectos les resultaron más molestos o qué influiría negativamente en su percepción de la calidad de experiencia si fuesen usuarios de la plataforma Polimedia. La mayoría de los evaluadores coincidió en los cuatro puntos siguientes:

Cambios bruscos de calidad

A pesar de que los cambios de calidad del vídeo fueran a mejor, las situaciones en las que es fácilmente perceptible el cambio de calidad generan desconcierto. Por ello, en el momento de crear los MPDs, cuantas más calidades haya disponibles, sobre todo en las calidades bajas donde es más evidente el cambio, menos desconcierto sentirá

el usuario. Aunque también ha de tenerse en cuenta el tiempo que se requiere para cambiar de calidad.

En situaciones con poco ancho de banda, es más probable que se produzcan muchos cambios de calidad, por ello, debería emplearse un algoritmo que evite que los saltos de calidad se produzcan con tanta frecuencia, como PANDA, nombrado anteriormente.

En la figura 61 se muestra al profesor en el vídeo con tamaño de cuadro de 1280x720, 1024x576 y 640x360, de izquierda a derecha. Si se comparan las tres se puede apreciar cómo las líneas del profesor se difuminan y las letras que están detrás de él se vuelven ilegibles. Tener situaciones en las que la calidad del vídeo varía de menos a más puede resultar desconcertante, pero en los momentos en los que el cambio de calidad se produce al contrario, es decir, cuando baja de una calidad buena a otra peor, el desconcierto es aún mayor y puede resultar incluso mareante para personas con dificultad en la visión. La diferencia que se aprecia entre la sección de una calidad y la otra es lo que los evaluadores han visualizado en las pruebas subjetivas de calidad de experiencia.



Figura 61: Efecto de los cambios de calidad en el vídeo de prueba

Tamaño de la fuente

El tamaño de letra excesivamente pequeño que se daba en algunas partes del contenido del vídeo ha sido uno de los motivos más influyentes en la disminución de la calidad de experiencia. El empleo de tipografías lo suficientemente grandes ayuda a elevar la percepción de la calidad del usuario en los momentos en los que la calidad es baja, ya que facilita la lectura. En la figura 62 se muestra la diferencia entre las letras usadas en el vídeo de prueba en cada una de las calidades. Donde el primero es el de mayor calidad, el segundo es la calidad media y el último es la menor calidad.



Figura 62: Diferencia en la legibilidad de las letras según la calidad

Para averiguar a partir de que tamaño la fuente resulta legible se ha probado a crear una imagen con letras a distintos tamaños y se ha reducido la calidad para apreciar los efectos (figura 63). Se ha mantenido la imagen a tamaño real para que el efecto sea totalmente visible. Las letras de la parte superior izquierda se corresponden con las de la calidad 1284x720, las de la parte superior derecha se corresponden con las de la calidad 1024x576 y las de la parte inferior se corresponden con las de la calidad 640x360. Como se puede apreciar, las letras de 9 puntos ya pueden resultar poco legibles para algunas personas en la máxima calidad (1280x720), por lo que al bajar de calidad resultan molestas e incluso ilegibles, como en la peor calidad (640x360). Para la calidad media (1024x576), el tamaño de 11 puntos puede representar una dificultad para algunas personas, pero es legible. Para la menor calidad (640x360), las letras de tamaño entre 9 y 14 puntos están demasiado borrosas para ser visualizadas con comodidad.

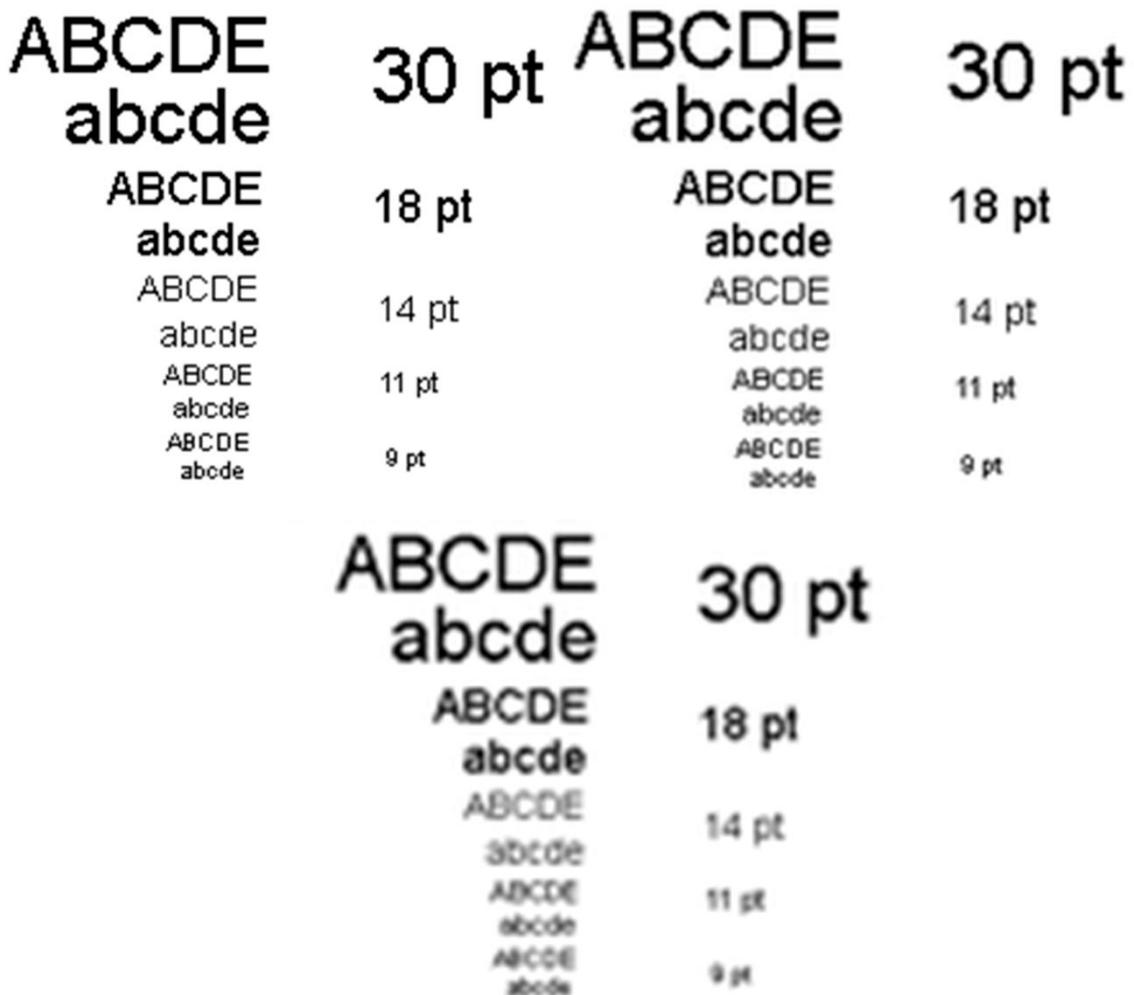


Figura 63: Efecto de la calidad en el tamaño de las fuentes

La razón por la que el tamaño de cuadro de 640x360 se ve mejor en otros dispositivos es por el tamaño de la ventana de visualización. Por lo tanto, en pantallas de menor tamaño, como en las tablets, los vídeos de peor calidad serán más legibles que comparándolos con pantallas de mayor tamaño.

Tipo de contenido

El tipo de contenido es un factor de influencia muy importante, ya que en las lecciones en las que el usuario necesite prestar más atención su umbral de tolerancia será más bajo, posibilitando el hecho de que abandone la visualización del vídeo para buscar un contenido de mayor calidad. En situaciones en las que el usuario no requiere prestar demasiada atención al contenido escrito en la pantalla, el umbral de tolerancia del usuario es más elevado, aceptando visualizar el vídeo en una calidad peor durante más tiempo.

En la figura 64 se muestra un fragmento de un vídeo de Polimedia en el que se explica el uso de un programa. La primera imagen se corresponde con la mayor calidad (1280x720) y la última con la menor (640x360). Para este tipo de contenido, en el que la imagen del programa ocupa la mayor parte de la pantalla es muy importante

comprobar que los botones que se pulsan y las acciones que se realizan son visualizados correctamente por el usuario.

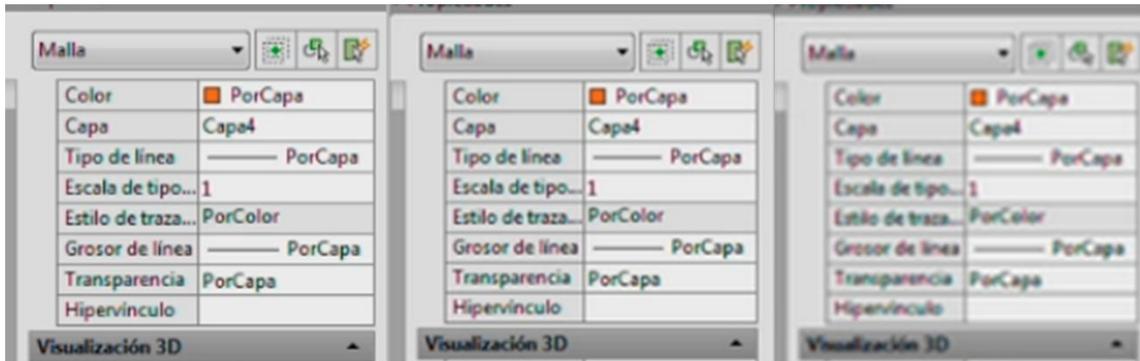


Figura 64: Efecto del cambio de calidad en la explicación de un programa

En la figura 65 se muestra lo que ocurre en el caso de utilizar páginas web. Las pestañas donde seleccionar la sección a la que se desea ir no son visibles en el caso de la peor calidad (640x360).



Figura 65: Efecto del cambio de calidad con el empleo de páginas web

En la figura 66 se muestra lo que ocurre con las gráficas de pequeño tamaño. En la sección de peor calidad (640x360) es imposible interpretar los valores de los ejes.

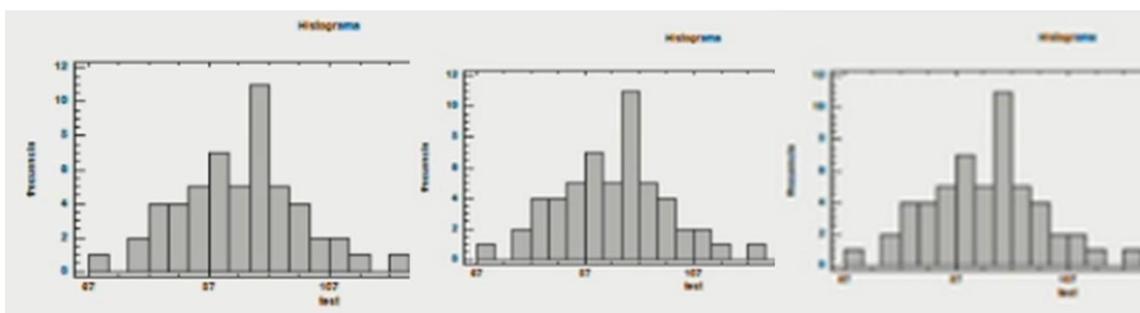


Figura 66: Efecto del cambio de calidad con el empleo de gráficas

En la figura 67 se muestra lo que ocurre con dibujos pequeños. Conforme se va perdiendo calidad, los detalles de los dibujos se pierden haciéndolos irreconocibles. Es recomendable que los dibujos sean del tamaño suficiente para que sean reconocibles en todas las calidades.

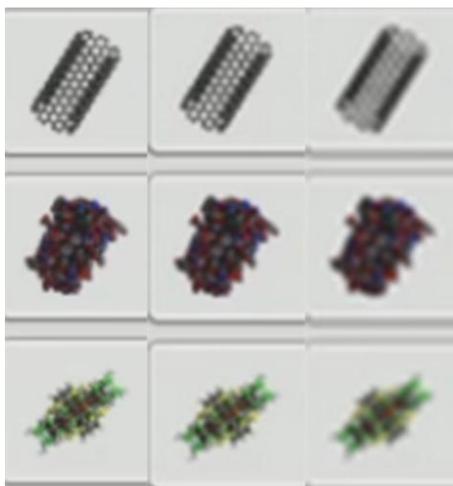


Figura 67: Efecto de la pérdida de calidad en dibujos

Motivación del usuario

El motivo por el que el usuario está visualizando el vídeo también supone un factor de influencia de gran importancia. Si la visualización del vídeo es necesaria para la realización de algún tipo de prueba de evaluación, el umbral de tolerancia del usuario también se verá reducido.

En estudios realizados sobre MPEG DASH nombrados anteriormente recomiendan tamaños de segmento de entre 2 y 8 segundos según criterios de calidad de servicio. Tras realizar las pruebas de laboratorio se puede determinar que los tamaños de segmento más estables para diferentes anchos de banda y condiciones de la red, y para el perfil de vídeo bajo demanda, son los tamaños de 8 segundos en adelante. A su vez, tras realizar el estudio subjetivo de la calidad de experiencia se ha demostrado que una longitud de segmento comprendida en el intervalo de 1 a 9 segundos es la opción más recomendada según criterios de calidad de experiencia. Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados de todas las pruebas, se puede determinar que el tamaño de segmento más adecuado para los vídeos de Polimedia es el de 8 segundos.

Se ha determinado que el aspecto que puede perjudicar la calidad de experiencia de los usuarios, y que los desarrolladores de reproductores aptos para el estándar MPEG DASH como el reproductor MP4Client/Osmo4, empleado en estas pruebas, deberían valorar es el hecho de que se comience a reproducir el contenido por la peor calidad disponible, a pesar de que las condiciones de la red sean favorables.

Si no se dispone de una implementación que permita comenzar por la mejor calidad que permita la red, la recomendación es utilizar fuentes con tamaños grandes, evitar imágenes y elementos de pequeño tamaño, evitar que el contenido con más relevancia se encuentre al inicio del vídeo y emplear tamaños de segmento de 8 segundos.

Es también importante tener en cuenta que la calidad de experiencia dependerá de la peor calidad de vídeo disponible y, por tanto, es necesario plantearse el menor valor de calidad a la que se está dispuesto a convertir el vídeo para mostrárselo posteriormente a los usuarios.

Capítulo 6: Conclusiones

6.1 Cumplimiento del objetivo

Se puede asegurar que se han cumplido los objetivos propuestos en el punto 1.2 del trabajo.

A partir del estudio realizado en el capítulo 5, se han detectado las áreas en las que el protocolo MPEG DASH, aplicado a Polimedia y con el software libre que se ha empleado, puede mejorar. Se ha realizado un estudio subjetivo de la calidad de experiencia en el punto 5.6, y se han detectado los aspectos que más molestan a los usuarios, tal como se describe en el punto 5.7. Por último, en ese mismo apartado, se detectan cuales son las características que debería tener un vídeo y las opciones a tener en cuenta para crear los MPDs para transmitir un vídeo MPEG DASH con la mejor calidad de experiencia posible.

6.2 Conclusiones sobre el trabajo

A lo largo de este trabajo se ha definido el concepto de calidad de experiencia. Se han detallado los factores de influencia que afectan a esta medida, así como las dos formas de obtener el valor de QoE, de forma objetiva o subjetiva, se han expuesto los parámetros de QoS que pueden afectar a la QoE y se han descrito las medidas que pueden realizarse para obtener este valor.

Se ha explicado la evolución del streaming y el funcionamiento del estándar de streaming adaptativo sobre HTTP llamado MPEG DASH, y se ha realizado un estudio de los avances en investigación sobre MPEG DASH que se han llevado a cabo en los últimos años.

Se ha explicado cómo instalar y emplear las herramientas necesarias para crear los archivos xml donde se detallan las diferentes calidades disponibles, cuyo nombre es MPD. Y se han detallado los comandos empleados explicando cada una de las opciones utilizadas.

Se ha expuesto el proceso de creación de un servidor de streaming multimedia empleando una máquina virtual y el software Paella Player, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, así como la forma colocar los archivos generados en el proceso de creación de los MPDs para que funcionen correctamente.

Se ha realizado un estudio en un entorno controlado para determinar cómo afecta el ancho de banda disponible al funcionamiento de MPEG DASH. Se ha detectado que empleando el reproductor de software libre MP4Client/Osmo4, el contenido de vídeo comienza a reproducirse por la menor calidad, mermando la experiencia de los usuarios. Se ha realizado un estudio subjetivo de la calidad de experiencia para cuantificar cómo afecta este factor a la calidad de experiencia del usuario.

Se han detectado los aspectos que resultan más molestos o que pueden influir negativamente en la calidad de experiencia de los usuarios de plataformas de e-learning como Polimedia, siendo estos los cambios bruscos de calidad, el tamaño de la fuente empleado en las transparencias que se muestran en el vídeo, el tipo de vídeo que se está visualizando y la motivación del usuario.

Por último, se han realizado unas recomendaciones para emplear MPEG DASH de forma óptima como, establecer el tamaño de segmento en 8 segundos, emplear tamaños de fuente razonablemente grandes, evitar elementos o imágenes de tamaño pequeño, introducir el contenido de relevancia tras un breve periodo de tiempo desde el comienzo del vídeo y comprimir el vídeo teniendo en cuenta la calidad mínima que se desea mostrar al usuario.

Según los resultados, MPEG DASH es un estándar ampliamente recomendado para su uso en plataformas de e-learning como Polimedia debido a sus altos valores de calidad de experiencia, incluyendo las situaciones en las que el ancho de banda es limitado.

6.3 Problemas encontrados y cómo se han solucionado

A lo largo de la realización de este trabajo se han planteado diversos problemas que se comentan a continuación:

- **Grado de implantación del estándar MPEG DASH en Polimedia:** Al comenzar este trabajo teníamos entendido que Polimedia estaba empleando MPEG DASH, pero no era así, sólo habían realizado pruebas. Por ello se dedicó una gran cantidad de tiempo a buscar la forma de poder crear el servidor multimedia para transmitir el contenido.
- **Herramientas para montar el servidor multimedia:** En un principio, se intentó utilizar otras herramientas para crear el servidor. Se instaló la versión gratuita de Wowza, pero sólo soporta MPEG DASH la versión de pago. Después se probó con Nimble, pero tampoco se consiguió que funcionase. Este proceso se alargó hasta un mes. Finalmente, se instaló el Paella Player, que soporta MPEG DASH en la versión developer.
- **Creación de los MPD:** Al no disponer durante bastante tiempo de un servidor, no se pudo comprobar si los MPDs se habían creado de forma correcta. Cuando se consiguió que funcionase el servidor, los vídeos no funcionaban correctamente y se tuvo que volver a realizar el proceso de creación de los MPDs para averiguar el error, lo que hizo que se perdiera tiempo.
- **Evaladores:** Ha sido complicado reunir a voluntarios para que pudiesen evaluar los vídeos.

6.4 Aportaciones personales

He aprendido a emplear las herramientas ffmpeg y MP4Box y a crear un servidor para transmitir contenido multimedia. También he aprendido sobre el funcionamiento de MPEG DASH y la forma de crear los vídeos y los MPDs para que tengan la mayor QoE posible.

6.5 Futuras líneas de trabajo

A partir de este estudio pueden derivarse otras investigaciones como:

- Desarrollar el algoritmo que permita que se comience a reproducir a partir de la mayor calidad que soporta la red.
- Estudiar la QoE del estándar MPEG DASH con vídeos de otras características como, por ejemplo, retransmisiones deportivas.
- Estudiar el efecto del tamaño de segmento para los vídeos en directo.

Referencias

- [1] Página web de Netflix. Disponible en: <https://www.netflix.com/es/>
- [2] Página web de Yomvi. Disponible en: <http://yomvi.plus.es/?nv=2>
- [3] Artículo de la web eumed: “2.7 Tendencias en la optimización del ancho de banda” . Disponible en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2008a/348/Tendencias%20en%20la%20Optimizacion%20del%20ancho%20de%20banda.htm>
- [4] Andrés López-Herreros, Alejandro Canovas, Jose M. Jiménez, Jaime Lloret, “A New IP Video Delivery System for Heterogeneous Networks using HTML5”, 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 7053-7058, Londres, Reino Unido, 8-12 Junio 2015.
- [5] ITU-T Study Group 12 (Geneva, 16-25 January 2007)
- [6] P. Le Callet, S. Moller, y A. Perkis, Eds., “Qualinet White paper on Definitions of Quality of Experience(QoE)”, Lausanne, Suiza, Versión 1.2, Mayo 2013, Disponible en: <http://www.qualinet.eu/>.
- [7] Sabina Barakovic y Lea Skorin-Fapov, “Survey and Challenges of QoE Management Issues in Wireless Networks”, Journal of Computer Networks and Communications Volume 2013, pp. 1-28, 12 Diciembre 2012. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/165146>
- [8] Ina Wechsung, Klaus-Peter Engelbercht, Christine Kühnel, Sebastian Möller y Benjamin Weiss, “Measuring the Quality of Service and Quality of Experience of multimodal human-machine interaction”, Journal on Multimodal User Interfaces, Volume 6, Issue 1, pp. 73-85, Berlín, Alemania, 27 Diciembre 2012.
- [9] R. Serral-Gracià, E. Cerqueira, M. Curado, M. Yannuzzi, E. Monteiro y X. Masip-Bruin, “An overview of Quality of Experience Measurement Challenges for Video Applications in IP Networks”, 8th International conference WWIC 2010, pp. 252-263, Lulea, Suecia, 1-3 Junio 2010.
- [10] ITU-T Recommendation P.800.1, “Mean Opinion Score (MOS) Terminology”, Julio 2006.
- [11] Shyamprasad Chikkerur, Vijay Sundaram, Martin Reisslein y Lina J. Karam, “Objective Video Quality Assessment Methods: A Classification, Review, and Performance Comparison”, IEEE Transactions on Broadcasting, Volume 57, Issue2, pp. 165-182, Arizona, USA, 23 de Mayo del 2011.
- [12] “Methodology for the Subjective Assesment of Quality of Television Pictures”, ITU-R Recommendation BT.500-11.
- [13] “Subjective video Quality assessment Methods for Multimedia Applications”, ITU-T Recommendation P.910, Septiembre 1999.

- [14] Artículo de la web mingfei: “How does video streaming work?[Part 2: Traditional Streaming]”, disponible en: <http://mingfeiy.com/traditional-streaming-video-streaming>
- [15] Artículo de la web mingfei: “How does video streaming work?[Part 1: Progressive Download]”, disponible en: <http://mingfeiy.com/progressive-download-video-streaming>
- [16] Artículo de la web streamingmedia: “What is adaptive streaming?” , disponible en: <http://www.streamingmedia.com/Articles/Editorial/What-Is-.../What-is-Adaptive-Streaming-75195.aspx>
- [17] Web de Adobe HTTP Dynamic Streaming. Disponible en: <http://www.adobe.com/products/hds-dynamic-streaming.html>
- [18] Artículo de globaldots: “Streaming: Adobe HDS”, disponible en: <http://www.globaldots.com/streaming-adobe-hds/>
- [19] Web para desarrolladores de Apple. Disponible en: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/NetworkingInternet/Conceptual/StreamingMediaGuide/Introduction/Introduction.html>
- [20] Artículo de globaldots: “Streaming: Adobe HLS”, disponible en: <http://www.globaldots.com/streaming-adobe-hls/>
- [21] Web de Microsoft. Disponible en: <https://www.microsoft.com/silverlight/smoothstreaming/>
- [22] Artículo de globaldots: “Streaming: Microsoft’s Smooth Streaming”, disponible en: <http://www.globaldots.com/streaming-microsoft-smoothstreaming/>
- [23] International Standard ISO/IEC 23009-1, “Information technology- Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH)-”, ISO/IEC JTC 1/SC 29, 15 Mayo 2014.
- [24] Artículo de globaldots: “Streaming: MPEG-DASH”, disponible en: <http://www.globaldots.com/streaming-mpeg-dash/>
- [25] Thorsten Lhomar, Torbjörn Einarsson, Per Fröjdh, Frédéric Gabin y Markus Kampmann, “Dynamic adaptive HTTP streaming of live content”, 2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), pp. 1-8, Lucca, Italia, 20-24 Junio 2011.
- [26] Stefan Lederer, Christofepher Müller y Christian Timmerer,” Dynamic adaptive streaming over HTTP dataset”, MMSys ’12 Proceedings of the 3rd Multimedia Systems Conference, pp. 89-94, NY, EEUU, 22 Febrero 2012.
- [27] Shenghong Hu, Lingfen Sun, Chao Gui, Emmanuel Jammeh y Is-Haka Mkwawa, “Content-aware adaptation scheme for QoE optimized dash applications”, 2014 IEEE Global Communications Conference, pp. 1336-1341, Austin, TX, EEUU, 8-12 Diciembre 2014.
- [28] Yuming Cao, Xiaoquan You, Jia Wang y Li Song, “A QoE friendly rate adaptation method for DASH”, 2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia System and Broadcasting, pp.1-6, Pekín, China, 25-27 Junio 2014.

- [29] Björn J. Villa, Katrien De Moor, Poul E. Heegaard y Anders Instefjord, "Investigating Quality of Experience in the context of adaptive video streaming: findings from an experimental user study", 2013 Proceedings of Norsk Informatikkonferanse (NIK 2013), pp. 122-133, Stavanger, Noruega, 18-20 Noviembre 2013.
- [30] A. Sideris, E. Markakis, N. Zotos, E. Pallis y C. Skianis, "MPEG-DASH users' QoE: The segment duration effect", 2015 Seventh International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), pp. 1-6, Pylos-Nestoras, Grecia, 26-29 Mayo 2015.
- [31] Christian Timmerer, Matteo MAiero, Benjamin Rainer, Stefan Petscharing, Daniel Weinberger, Christofer Mueller y Stefan Lederer, "Quality of Experience of Adaptive HTTP Streaming in Real-World Environments", IEEE COSMOSC MMTC E-Letter, pp. 1-4, Austria, Mayo 2015.
- [32] Ognen Ognenoski, Manzoor Razaak, Maria G. Martini y Peter Amon, "Medical video streaming utilizing MPEG-DASH", 2013 IEEE 15th International Conference on e-health Networking, Applications & Services (Healthcom), pp. 54-59, Lisboa, Portugal, 9-12 Octubre 2013.
- [33] Toshiro Nunome y Hiroaki Tani, "Multi-view video and audio transmission with MPEG-DASH and its QoE", 2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), pp. 575-579, Kyoto, Japón, 14-16 Octubre 2015.
- [34] Página web de FFmpeg. Disponible en: <https://ffmpeg.org/> Visto en 27/04/2016.
- [35] Página de Gpac. Disponible en: <https://gpac.wp.mines-telecom.fr/home/> Visto en 28/04/2016.
- [36] Página web de Zerano FFmpeg. Disponible en: <https://ffmpeg.zerano.com/builds/> Visto en 27/04/2016.
- [37] Página de descargas de Gpac. Disponible en: <https://gpac.wp.mines-telecom.fr/downloads/> Visto en 27/04/2016.
- [38] Vídeo "Retos de la agricultura y la alimentación en el siglo XXI. Presentación de la segunda edición". Disponible en: <https://media.upv.es/player/?id=cce4ac7e-60da-0444-b50f-333d6dd3f06f&autoplay=true>
- [39] Página de MP4Box. Disponible en: <https://gpac.wp.mines-telecom.fr/mp4box/dash/> Visto en 27/04/2016.
- [40] Artículo "How to encode Multi-bitrate videos in MPEG-DASH for MSE based media players (1/2)" de la web StreamRoot. Disponible en: <https://blog.streamroot.io/encode-multi-bitrate-videos-mpeg-dash-mse-based-media-players-22/> Visto en 27/01/2016.
- [41] Página web de Ubuntu. Disponible en: <http://www.ubuntu.com/>
- [42] Página de MobaXterm. Disponible en: <http://mobaxterm.mobatek.net/>
- [43] Página web de Paella Player. Disponible en: <http://paellaplayer.upv.es/>

- [44] Página web de Node.js. Disponible en: <https://nodejs.org/en/>
- [45] Página web de Grunt.js. Disponible en: <http://gruntjs.com/>
- [46] Página web de VLC. Disponible en: <http://www.videolan.org/vlc/>
- [47] Página web de BITMOVIN. Disponible en: <https://bitmovin.com/>
- [48] Página web de dash.js. Disponible en: <http://dashif.org/>
- [49] Página web de BITMOVIN para pruebas de vídeos DASH. Disponible en: <http://bitmovin.com/hls-mpeg-dash-test-player/>
- [50] Página web de dash.js para pruebas de vídeos DASH. Disponible en: <http://dashif.org/reference/players/javascript/1.4.0/samples/dash-if-reference-player/>
- [51] Página web de Wireshark. Disponible en: <https://www.wireshark.org/>
- [52] Trabajo Fin de Carrera, “Desarrollo de una aplicación basada en Java para testear el rendimiento de una red de datos” de Carlos Barambones Ferrera. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/34143>