

# Un nuevo enfoque para la adaptación de caudal en transmisiones multicast en SDWN

Estefanía Coronado<sup>1</sup>, Roberto Riggio<sup>2</sup>, José Villalón<sup>1</sup>, Antonio Garrido<sup>1</sup>

*Resumen*— En los últimos años, la distribución de contenido multimedia en redes inalámbricas está sufriendo un gran auge, siendo el estándar IEEE 802.11 uno de los más utilizados. Debido a la naturaleza del canal, todos los paquetes transmitidos deben ser confirmados, a excepción de las comunicaciones multicast. Bajo este estándar las transmisiones en modo multicast se realizan mediante un procedimiento de broadcast en el que el emisor no espera la confirmación de los paquetes. Esta falta de *feedback* hace que la información deba ser enviada a una velocidad básica y que los paquetes erróneos no puedan ser recuperados. Para solucionar estas limitaciones, la enmienda IEEE 802.11aa incorpora un conjunto de propuestas para el tráfico multicast. A pesar de mejorar las prestaciones del estándar original, se ha demostrado que estos esquemas sufren numerosas limitaciones. En este trabajo se muestra una arquitectura basada en SDN (*Software Defined Networks*) para la mejora de las comunicaciones en modo multicast en redes IEEE 802.11. En dicha arquitectura se pretende dar soporte para adaptar la velocidad de envío del tráfico multicast a las condiciones del canal, optimizando así la utilización del medio inalámbrico y mejorando el rendimiento de la red.

*Palabras clave*— IEEE 802.11, SDWN, WLANs, multicast, multimedia

## I. INTRODUCCIÓN

ACTUALMENTE, las redes inalámbricas se encuentran en un periodo de gran expansión, debido a su bajo coste, su facilidad en el despliegue y a la libertad de movimiento que proporcionan. Otro factor muy importante ha sido la aparición del estándar IEEE 802.11 [1], sus continuas revisiones y el desarrollo de sus enmiendas de mejora. Debido a la naturaleza del canal de transmisión, en este estándar todos los paquetes enviados deben ser confirmados por el receptor. Si el emisor no recibe la confirmación del paquete, éste deberá retransmitirlo. De este forma, se aporta fiabilidad a las transmisiones en un entorno con cambios constantes en la calidad del canal y con alta probabilidad de colisiones. Además, esta información es utilizada por el emisor para adaptar la velocidad de transmisión a las condiciones de canal.

Para evitar una avalancha de colisiones, en las transmisiones en modo multicast el emisor no espera la confirmación de los paquetes. Esta falta de confirmación hace que estos paquetes no puedan ser retransmitidos y que una gran cantidad de ellos sean descartados. Además, el desconocimiento del estado del canal impide adaptar la velocidad de en-

vío. Como consecuencia, el estándar recomienda usar una velocidad básica de transmisión para este tipo de tráfico, reduciendo considerablemente la cantidad de datos que se envían por la red.

Por otro lado, la distribución de contenidos multimedia a través de Internet ha crecido exponencialmente en los últimos años. Entre los posibles modos de acceso a estas aplicaciones, el uso de WLANs (*Wireless Local Area Networks*) es uno de los más habituales. Este tipo de comunicaciones no solo se caracterizan por las altas necesidades de ancho de banda, sino que además imponen restricciones severas en cuanto a retardos, *jitter* y tasas de descarte. Es decir, las aplicaciones multimedia necesitan soporte de QoS (*Quality of Service*). Garantizar estos requisitos de QoS en redes IEEE 802.11 es una tarea compleja debido al modo de operación de su capa MAC (*Media Access Control*), al riesgo de colisión de los paquetes y a las dificultades de transmisión debidas a la propagación de la señal.

Para mejorar el soporte de QoS, la enmienda IEEE 802.11e [2] pretende otorgar una mayor prioridad a las aplicaciones en tiempo real. Con ello, las prestaciones de las aplicaciones multimedia mejoran considerablemente. Sin embargo, en dicha enmienda no se presta atención a las comunicaciones multicast. La enmienda IEEE 802.11aa [3] trata de aportar mayor robustez a las comunicaciones multicast a través de distintos esquemas para la retransmisión de paquetes. Sin embargo, esta enmienda continúa sin incluir mecanismo alguno para la adaptación de caudal en transmisiones multicast.

El aumento del tamaño de las redes y la integración de dispositivos de distintos fabricantes suponen cada vez más un problema para su gestión. Por ello, las redes basadas en SDN (*Software Defined Networks*) han experimentado un reciente auge ya que proporcionan una abstracción del hardware de la red. Así, la inteligencia se recoge en un controlador central que toma las decisiones sobre el control de la misma. Este enfoque permite separar el funcionamiento de la red en un plano de control y un plano de datos, simplificando así su gestión. Sin embargo, resulta complicado encontrar esquemas dirigidos a redes SDN inalámbricas, ya que los estándares publicados, como es el caso de OpenFlow [4], tan sólo se centran en redes cableadas.

El objetivo de este trabajo es adaptar la velocidad de transmisión en modo multicast sobre una arquitectura basada en SDN. Para ello, se establecen periodos de tiempo, donde se alternan el envío de datos sin confirmación y el uso de políticas de retransmisión incluidas en IEEE 802.11aa. Además, el

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A). Universidad de Castilla-La Mancha, e-mail: {Estefania.Coronado, JoseMiguel.Villalon, Antonio.Garrido}@uclm.es

<sup>2</sup>CREATE-NET. Trento (Italia), e-mail: rriggio@create-net.org

esquema define dos modos de funcionamiento distintos para conocer el estado del canal. El primer modo toma esta información a partir de las estadísticas recogidas durante el envío de paquetes unicast. Por el contrario, el segundo enfoque reduce el *overhead* con respecto al primero, ya que los paquetes en modo unicast solo son enviados a aquellos receptores con peores condiciones. De este modo, se reduce el ancho de banda utilizado, mejorando así el rendimiento de las comunicaciones en la red.

Este artículo se organiza como sigue. La Sección II describe la enmienda IEEE 802.11aa y una serie de esquemas de adaptación del caudal en transmisiones multicast. La Sección III recoge los principios básicos del paradigma SDN. El esquema propuesto se muestra en la Sección IV, mientras que los resultados de su evaluación se presentan en la Sección V. En la Sección VI se exponen las conclusiones extraídas. Por último, algunas propuestas de trabajo futuro se incluyen en la Sección VII.

## II. REDES IEEE 802.11

El IEEE 802.11 es el estándar de referencia en WLANs, debido principalmente a la sencillez de funcionamiento. Sin embargo, precisamente su sencillez le ha ocasionado ciertas limitaciones que se han ido solucionando a través de numerosas enmiendas de mejora. En la primera versión de este estándar se definen dos funciones de acceso al medio a nivel MAC, como son DCF (*Distributed Coordination Function*) y PCF (*Point Coordination Function*). DCF usa un mecanismo de acceso al medio distribuido, donde todas las estaciones utilizan los mismos tiempos de espera para acceder al canal, por lo que no se proporciona soporte de QoS. PCF utiliza la anterior como base para su funcionamiento y, dado que su implementación es opcional, su uso no está extendido en tarjetas comerciales. Por ello, la enmienda IEEE 802.11e define HCF (*Hybrid Coordination Function*) como una nueva función de acceso al canal capaz de otorgar una mayor prioridad a las aplicaciones de voz y vídeo. Sin embargo, esta enmienda no tuvo en cuenta las características especiales que presentan las aplicaciones multimedia en modo multicast.

Las transmisiones multicast suponen una forma eficiente de envío de datos de un emisor a un conjunto de receptores ya que se reduce el coste para enviar un mismo paquete en modo unicast a todos los receptores del grupo. Sin embargo, dado que estas transmisiones se llevan a cabo mediante un procedimiento de broadcast, el emisor no espera la confirmación de los paquetes. Con ello se pretende eliminar las colisiones de los paquetes de respuesta, ya que de lo contrario los ACKs enviados colisionarían, provocando que el emisor retransmitiese la información. No obstante, como consecuencia se produce una falta de fiabilidad en la transmisión. Además, resulta imposible adaptar la velocidad de transmisión a las condiciones del medio, por lo que la velocidad de envío se fija a la tasa básica.

En vista de lo anterior, existen numerosos traba-

jos que tratan de solventar los problemas descritos. Además, el IEEE formó un grupo de trabajo encargado de diseñar una enmienda de mejora (IEEE 802.11aa) que, manteniendo la compatibilidad con los dispositivos existentes, fuera capaz de mejorar las comunicaciones multicast en este estándar.

### A. IEEE 802.11aa

La enmienda IEEE 802.11aa presenta el servicio GATS (*Group Addressed Transmission Service*), cuyo objetivo es adaptar la transmisión a las necesidades de las aplicaciones y de las estaciones, aportando así una mayor fiabilidad. Esta fiabilidad se introduce primeramente en la enmienda IEEE 802.11v [5], donde se describe el funcionamiento del WNM (*Wireless Network Management*). Como parte del servicio GATS, se definen dos nuevos mecanismos que pretenden aumentar la fiabilidad: DMS (*Directed Multicast Service*) y GCR (*GroupCast with Retries*).

El servicio DMS consiste en la conversión a nivel TID (*Traffic Identifier*) del tráfico multicast a unicast. Este envío consigue solventar los problemas de fiabilidad y del uso de una tasa fija de transmisión. Sin embargo, este servicio tiene graves problemas de escalabilidad ya que el tráfico de la red depende directamente del tamaño del grupo multicast, pudiéndose utilizar únicamente para grupos muy pequeños.

Por otro lado, en GCR pueden distinguirse tres servicios distintos:

- *Legacy multicast*. Este mecanismo se trata del método de envío en modo multicast definido en el estándar IEEE 802.11 original.
- *GCR-Unsolicited retries*. Mediante esta política, se especifica un número de reintentos,  $N$ , de modo que el emisor transmite  $N+1$  veces un mismo paquete multicast. De este modo, se aumenta la probabilidad de que la transmisión llegue correcta a su destino. No obstante, el número de retransmisiones innecesarias puede comprometer el rendimiento de la red.
- *Block-ACK*. Este método es el más sofisticado y permite aunar la transmisión en modo multicast con la recepción de información de *feedback*. El mecanismo Block-ACK consiste en el reconocimiento de varios paquetes de datos haciendo uso de un simple paquete ACK. De este modo se permite elevar la fiabilidad en la transmisión sin penalizar en exceso la escalabilidad.

### B. Esquemas de adaptación del caudal de envío

La adaptación del caudal de transmisión en multicast pasa por la definición de mecanismos de *feedback* que permitan al emisor conocer el estado del canal. Además, estos mecanismos son utilizados para mejorar la fiabilidad del envío. En este sentido, surgen distintos enfoques que tratan de abordar el problema.

Los esquemas basados en líder son los más habituales, entre los que destaca LBP (*Leader Based Protocol*) [6]. En esta propuesta, la estación con

peor calidad de canal se convierte en líder y se encarga de confirmar los paquetes multicast. El resto de estaciones se limitan al envío de confirmaciones negativas para solicitar la retransmisión de información. Sin embargo, no se define un mecanismo para la selección del líder. ARSM (*Auto Rate Selection Multicast*) [7] define un esquema dividido en dos fases. En la primera de ellas, se selecciona o actualiza el líder del grupo, mientras que durante la segunda, se adapta la velocidad de envío usando el SNR (*Signal Noise Ratio*) de las confirmaciones del líder. H-ARSM (*Hierarchical ARSM*) [8] es una evolución de ARSM diseñado para la transmisión de vídeo jerárquico multicast en WLANs. Así, se asegura que todas las estaciones reciben una calidad mínima de la secuencia, y que aquellos con mejor calidad de canal, sean capaces de recibir capas de mejora.

La adaptación del caudal de transmisión basada en SNR es igualmente utilizada en SARM (*SNR - Base Auto Rate for Multicast*) [9]. Este esquema se basa en el envío de paquetes de *beacon* para identificar el peor receptor. En este paquete, el AP incluye el SNR percibido por el peor receptor multicast, de modo que, si alguna estación cuenta con una peor calidad, deberá responder a esta petición. No obstante, la implementación de este esquema conlleva la modificación de los paquetes de *beacon*.

Otro enfoque utilizado es el que busca mejorar el nivel de QoE (*Quality of Experience*) percibido en las aplicaciones multimedia. En [10] se diseña una red neuronal para construir un modelo capaz de mapear mediciones de QoE con tasas de transmisión. Para ello, se emplea una métrica híbrida de QoE que simula la evaluación real de los usuarios.

A pesar de las mejoras, la mayoría de los esquemas mostrados son diseñados y evaluados mediante herramientas de simulación, o introducen mecanismos incompatibles con el estándar IEEE 802.11.

### III. SOFTWARE DEFINED WIRELESS NETWORKS

El crecimiento de los servicios de comunicaciones y la explosión de contenidos multimedia ha hecho necesario un replanteamiento en las arquitecturas de red tradicionales. Las tecnologías de red actuales poseen limitaciones como la dependencia de los fabricantes, el aumento de la complejidad a medida que lo hace el tamaño y la necesidad de un personal humano centrado en su continua administración.

En este panorama las redes definidas por software, o SDN, proponen una nueva arquitectura de red totalmente programable. De este modo, la funcionalidad de los dispositivos se divide en los planos de control y de datos, permitiendo así abstraer la infraestructura de la red a servicios y aplicaciones, tal y como se muestra en la Figura 1. Como consecuencia, la inteligencia de la red, hasta ahora distribuida sobre varios elementos de la misma, se concentra sobre un controlador central. Dicho controlador posee una visión completa de la red, lo que le permite tomar las decisiones de gestión y control más apropiadas.

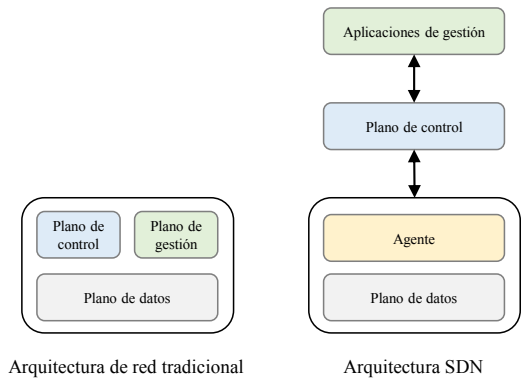


Fig. 1. Evolución de la arquitectura tradicional a la de SDN

La arquitectura SDN se divide en tres grandes capas, conocidas como capas de infraestructura, de control y de datos. La capa de infraestructura, o plano de datos, comprende los dispositivos de red encargados del encaminamiento de paquetes. Estos dispositivos se encuentran en constante comunicación con la capa de control a través de la interfaz *southbound*. Por su parte, las aplicaciones SDN permiten simplificar las tareas de gestión y configuración de nuevos servicios de red. Dichas aplicaciones se sitúan en la capa de aplicación, comunicándose con el controlador a través de la interfaz *northbound*.

Dado que la inteligencia de los dispositivos se simplifica sustancialmente, la interfaz *southbound* se convierte para el controlador en un elemento clave para obtener información del estado de la red. Uno de los estándares más utilizados en las comunicaciones de la interfaz *southbound* es OpenFlow. Sin embargo, se trata de un protocolo dirigido a redes cableadas, por lo que las funcionalidades que proporciona se encuentran relativamente alejadas de las necesidades de las redes inalámbricas.

Todos estos factores han llevado al paradigma SDN a convertirse en uno de los temas de investigación más punteros en WLANs. Recientemente, varios autores han propuesto arquitecturas para redes IEEE 802.11 basadas en el paradigma SDN. Algunas de las propuestas tratan de solventar las deficiencias de OpenFlow en entornos inalámbricos mediante la definición de abstracciones de programación destinadas al control de grandes redes [11] o a la simplificación en la gestión de clientes [12].

Los trabajos anteriores se centran en transmisiones unicast y apenas existe investigación relacionada con comunicaciones multicast. En esta línea, MultiFlow [13] trata de mejorar las comunicaciones multicast a través de la réplica de los paquetes para cada destinatario. De este modo, el controlador de la red se encarga de llevar a cabo esta tarea en función del ancho de banda disponible, mejorando con ello la calidad de las comunicaciones. No obstante, los resultados sólo son presentados como un análisis numérico. Además, este esquema cuenta con la desventaja de que el uso del medio inalámbrico puede superar el de un envío típico en modo multicast cuando el grupo excede un

determinado tamaño.

#### IV. ARQUITECTURA BASADA EN SDN PARA LA ADAPTACIÓN DEL CAUDAL EN MULTICAST EN REDES IEEE 802.11

El crecimiento del volumen de datos transmitido y del tamaño de las redes, hacen que los APs sean incapaces de encargarse del encaminamiento de paquetes y ejecutar algoritmos de adaptación de caudal en tiempo real.

Las aplicaciones multimedia requieren de rápidos ajustes en la gestión de la red debido a que la pérdida de información puede perjudicar gravemente la calidad percibida por el usuario. Para solventar estos problemas, nuestra propuesta se basa en la implementación de un algoritmo situado sobre un controlador SDN capaz de ajustar de forma inteligente el caudal de las transmisiones multicast. En este sentido, se pretende optimizar el uso del canal inalámbrico y mejorar el rendimiento de las comunicaciones multimedia destinadas a un grupo de receptores.

##### A. Arquitectura EmPOWER

Dado que el protocolo OpenFlow no es capaz de cubrir las necesidades de las redes inalámbricas, el esquema propuesto toma como referencia la arquitectura de red basada en SDN presentada en [14]. Esta arquitectura es conocida como *EmPOWER* y proporciona un protocolo muy eficiente en la comunicación entre el plano de control y de datos, conocido como Protocolo EmPOWER. Así, se introduce un nuevo paradigma capaz de proporcionar una serie de abstracciones de programación en SDNs.

*EmPOWER* define una pila software donde se distinguen, como es habitual en SDN, las capas de infraestructura, control y aplicación (véase la Figura 2). La capa de infraestructura consiste en un camino de datos programable basado en 802.11 diseñado para los APs de la red, conocidos en esta arquitectura como WTPs (*Wireless Termination Points*). Igualmente, la implementación del controlador SD-RAN se sitúa en la capa de control. Por último, en la capa de aplicación se presenta un SDK basado en Python con el objetivo de proporcionar un entorno de programación para aplicaciones de red dedicadas a la gestión de la misma.

La lógica de los APs se divide en dos componentes claramente diferenciados. El router modular Click [15] se emplea para la implementación del camino de datos 802.11, mientras que OpenvSwitch [16] se encarga del manejo de la comunicación con el controlador a través de una conexión TCP persistente. El sistema almacena además información de estado de cada cliente, designada como LVAP (*Light Virtual Access Point*), donde pueden encontrarse detalles relacionados con los procesos de asociación, autenticación, movilidad de la estación o planificación de los recursos utilizados. De este modo, se consigue simplificar el manejo y gestión de la red.

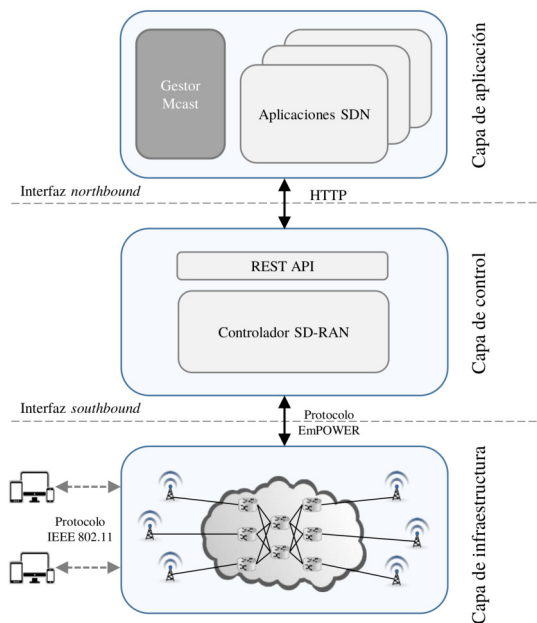


Fig. 2. Arquitectura de *EmPOWER*

##### B. MCast

El algoritmo *MCast* de adaptación de caudal se sitúa sobre la capa de control, tal y como se muestra en la Figura 2. Como resultado, éste puede beneficiarse de la inteligencia del controlador y de la información contenida en él. Esta propuesta pretende utilizar la información estadística derivada del algoritmo Minstrel [17] para adaptar la velocidad de transmisión, ya que éste actualiza continuamente la probabilidad de éxito de una futura transmisión en función de la velocidad de envío. Sin embargo, esta actualización se realiza a través de las confirmaciones de los paquetes, por lo que este algoritmo no puede aplicarse directamente a comunicaciones multicast. Relacionado con ello, *EmPOWER* actualmente no proporciona soporte para comunicaciones multicast básicas y, por tanto, tampoco se encuentran implementadas ninguna de sus políticas de retransmisión. Por este motivo, añadir estas funcionalidades resulta esencial para el desarrollo posterior del esquema propuesto.

El modo de operación de *MCast* se divide en dos fases que se repiten durante el transcurso de una transmisión (véase la Figura 3). Sin embargo, estas fases no poseen la misma duración: la primera de ellas se extiende durante una décima parte del tiempo, mientras que el resto se dedica a la segunda fase. Esta división se realiza de acuerdo a las políticas de retransmisión utilizadas y busca introducir el mínimo tráfico adicional en la red, a la vez que hace posible obtener información sobre el estado del medio.

La primera fase comienza al inicio de una nueva transmisión, donde se utiliza la política de retransmisión DMS. Con ello, se pretende permitir a Minstrel recoger información sobre los receptores del grupo multicast. Tras finalizar este periodo, el con-

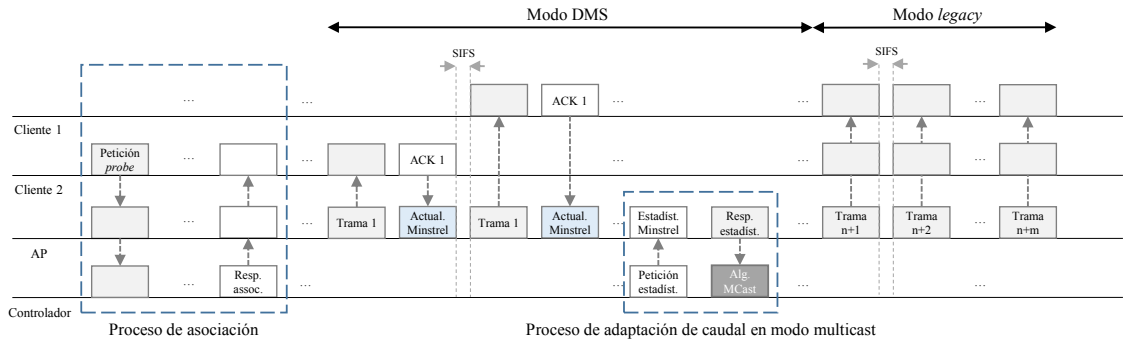


Fig. 3. Funcionamiento de *MCast*

trolador solicita esta información a los APs de la red, de donde *MCast* toma los datos necesarios para ajustar el caudal de envío. Este ajuste sigue el enfoque que se describe a continuación. En primer lugar, el algoritmo selecciona para cada estación la velocidad de transmisión con la probabilidad de éxito más alta. A partir de estos datos, se establece un enfoque basado en la técnica del peor receptor. Así, para cada transmisión multicast en la que participa cada AP, el algoritmo selecciona el caudal que ofrece el mayor rendimiento para todos los receptores. De este modo, se asegura que todas las estaciones reciben la información de forma correcta sin incrementar el ratio de paquetes perdidos.

Tras seleccionar la nueva velocidad de envío, la información se transmite en la segunda fase basándose en el enfoque clásico de multicast, donde el envío de conformaciones está deshabilitado. Sin embargo, en lugar de emplear una velocidad de transmisión básica, el controlador establece el valor calculado en la primera fase como el caudal de las comunicaciones en modo multicast. Una vez que esta segunda fase finalice, el proceso completo vuelve a iniciarse con el objetivo de actualizar la información estadística y permitir a *MCast* recalcular la nueva tasa de envío.

No obstante, en comunicaciones dirigidas a grupos multicast muy amplios, aun tratándose de un corto intervalo de tiempo, el envío de tramas en modo unicast a todas las estaciones podría conllevar la congestión de la red. Por este motivo, se propone un modo alternativo de funcionamiento de *MCast*, donde el envío de tramas unicast tan sólo se realiza para aquellos receptores con peor calidad de canal. No obstante, la identificación de estas estaciones no resulta una tarea trivial.

La enmienda IEEE 802.11k [18] fue definida para facilitar la recuperación de información estadística y adaptar así los parámetros de la red. Para ello se establece un mecanismo de petición y respuesta entre las estaciones y los APs, que permite obtener datos acerca de la potencia de la señal o del nivel de SNR, entre otros. A pesar de las mejoras introducidas, esta enmienda no ha sido aún incorporada por muchos dispositivos comerciales. De hecho, tan sólo los dispositivos Apple ofrecen esta funcionalidad [19]. Esta limitación hace que sea necesario explorar otras opciones. Scapy [20] es una potente herramienta de

manipulación de paquetes cuyas funcionalidades incluyen la generación y captura de paquetes o la decodificación de un amplio número de protocolos de red. Por ello, Scapy se considera una alternativa real para obtener información similar a la ofrecida por la enmienda IEEE 802.11k.

En nuestro entorno, Scapy se ejecuta continuamente en cada estación con el objetivo de conocer detalles como la cantidad de paquetes recibidos o la potencia de la señal. Así pues, estos datos resultan más que suficientes para conocer los peores receptores del grupo. Esta información es enviada periódicamente al controlador utilizando para ello el *REST-server* del controlador. De este modo, *MCast* es capaz de identificar las estaciones a las que debe enviar los paquetes en modo unicast durante la primera fase del algoritmo. Para ello, se asume que la velocidad de transmisión seleccionada será igualmente apropiada para el resto de destinatarios dado que poseen unas mejores condiciones de canal.

Como resultado de este enfoque, el tiempo en el que el canal se encuentra ocupado se reduce considerablemente. Este periodo es aún menor en el segundo modo de funcionamiento debido a la reducción de transmisiones unicast. Sin embargo, Scapy requiere del uso de una interfaz monitora que permita recoger los datos. Por ello, la adaptación de este segundo enfoque no resulta totalmente estándar, algo que no ocurre con el primer modo de funcionamiento y que es totalmente compatible con los dispositivos de red del mercado. En cualquiera de los casos, el resto de transmisiones de la red pueden aprovechar mejor el ancho de banda y mejorar como consecuencia el rendimiento global de la misma.

## V. EVALUACIÓN PRELIMINAR

Dada la novedad del trabajo presentado, éste se encuentra en pleno desarrollo. Sin embargo, se ha llevado a cabo una evaluación preliminar que permita comprobar sus prestaciones e identificar posibles deficiencias que deban solventarse. En ella se recogen tan sólo los resultados del esquema compatible con el estándar IEEE 802.11 en el que todas las estaciones reciben las tramas unicast. El objetivo de estas pruebas es evaluar el rendimiento que *MCast* ofrece en comparación con la transmisión multicast donde no se realizan confirmaciones de paquetes y

con aquella donde se emplea DMS.

La evaluación de prestaciones se ha llevado a cabo en un entorno real de trabajo. Para ello, la experimentación se ha realizado sobre el *testbed 5G-EmPOWER* situado en Create-Net (Trento, Italia), donde se ha implantado el esquema de adaptación de caudal multicast desarrollado. Para esta evaluación, este *testbed* está formado por 3 puntos de acceso, los cuales se componen de placas PCEngines ALIX y una pareja de tarjetas de red inalámbricas. De este modo, se ofrece la posibilidad de trabajar tanto en la banda de frecuencia de 2.4 como en la de 5.2 GHz. El controlador de la red se sitúa sobre un portátil Dell E64100 equipado con un procesador Intel i7 y 8 GB de memoria RAM. Está máquina utiliza como sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS.

Para llevar a cabo las pruebas se definen 5 grupos multicast, donde el tamaño del grupo oscila entre 1 y 5 receptores. Como receptores se han empleado 5 PCs convencionales: 2 equipos Dell E6540 y 3 equipos Dell E5450, ambos equipados con un procesador Intel Core i7 y 8GB de RAM. Estas máquinas emplean como sistema operativo Ubuntu 16.04 LTS y una versión actualizada de Windows 10. Además, para evitar la variabilidad de los resultados, para cada esquema se han realizado 5 repeticiones de cada prueba, manteniendo las condiciones de evaluación.

*MCast* define dos periodos de tiempo en su funcionamiento. Dicho periodo se ha establecido en 5 segundos, donde 0.5 segundos se dedican a la transmisión multicast empleando DMS y en los 4.5 segundos restantes la información es enviada sin esperar confirmación alguna. Todos los escenarios han sido evaluados mediante transmisiones de vídeo de un minuto, ya que se trata de un contenido más sensible a retrasos y pérdidas de paquetes. Para ello se han empleado secuencias de evaluación del estándar HEVC (*High Efficiency Video Coding*) como *Race Horses* y *Blowing Bubbles* y la herramienta FFmpeg [21], un potente entorno capaz de codificar, transmitir y recibir secuencias multimedia en tiempo real. Mediante esta herramienta se pretende obtener un comportamiento lo más real posible, ya que la información es transmitida en paquetes de distintos tamaños. Dado que se trata de comunicaciones multicast, la información se transmite mediante UDP, por lo que la única opción de recuperación de paquetes se encuentra a nivel de capa MAC.

La adaptación del caudal en las transmisiones permite igualmente reducir el tiempo de ocupación del canal durante las mismas. Dado que *MCast* transmite la información en el modo multicast habitual en el 90% de los casos, la cantidad de información extra transmitida durante la fase unicast resulta mínima. Esta evolución se presenta en la Figura 4. En ella puede observarse cómo DMS resulta totalmente inviable ya que la cantidad de datos enviados crece incesantemente a medida que lo hace el tamaño del grupo. Por contra, el enfoque clásico multicast mantiene constante el nivel de datos enviado. En este sentido, nuestra propuesta introduce una mín-

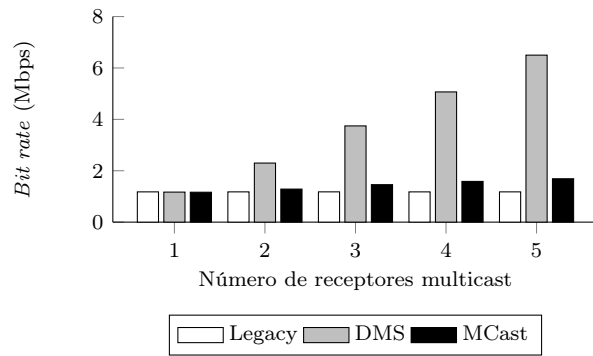


Fig. 4. *Bit rate* generado en función del número de receptores

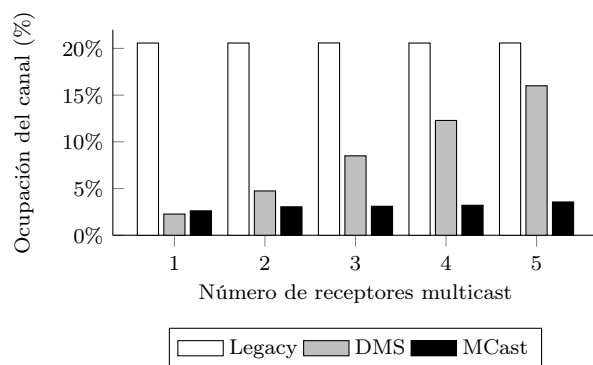


Fig. 5. Ocupación del canal según el número de receptores

ima cantidad adicional de datos con respecto a la transmisión multicast, que a penas se ve incrementado a pesar de aumentar el número de receptores y que resulta muy inferior al generado por DMS.

Como consecuencia de lo anterior, *MCast* es capaz de reducir la ocupación del canal drásticamente, tal y como se observa en la Figura 5. Es importante anotar que en ella tan sólo se muestra el tiempo necesario para transmitir los paquetes de datos, dejando fuera de la comparativa los tiempos de espera entre ellos. En las transmisiones multicast la información es enviada una sola vez independientemente del número de estaciones, por lo que la ocupación del canal permanece constante. Sin embargo, dada la baja velocidad de transmisión empleada, el tiempo que el canal permanece ocupado es demasiado alto. Por otro lado, debido a la réplica de paquetes, DMS prácticamente duplica este tiempo a medida que aparece un nuevo receptor en la red. En este caso, dada la escasa introducción de tráfico adicional, nuestro esquema mantiene prácticamente constante el tiempo de ocupación del canal, manteniéndose en todos los casos por debajo del resto de opciones.

A pesar de emplear una velocidad de transmisión más alta, *MCast* alcanza un rendimiento en las comunicaciones mayor de lo que lo hace el enfoque clásico. Esta situación puede observarse en la Figura 6. Este rendimiento resulta ligeramente superior cuando se utiliza la política DMS, ya que el envío en modo unicast es totalmente adaptado a las condiciones de cada receptor. No obstante, este descenso resulta prácticamente despreciable si se tiene



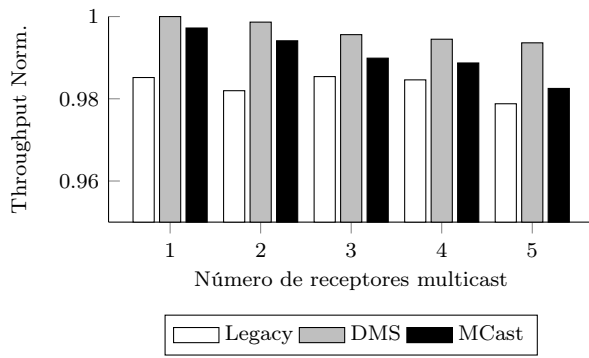


Fig. 6. Throughput multicast normalizado

en cuenta el nivel de rendimiento ofrecido y la optimización lograda en el uso del medio.

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se propone un nuevo enfoque para la adaptación de la velocidad de las transmisiones multicast en redes IEEE 802.11, empleando para ello una arquitectura basada en SDN. Así, se lleva a cabo la implementación de un algoritmo, que es ejecutado sobre el controlador central de la red. Mediante la alternancia de políticas de retransmisión, el controlador es capaz de recuperar información sobre la calidad de canal percibida por cada receptor. De esta forma, el algoritmo cuenta con los datos necesarios para calcular la velocidad de envío más adecuada para todas las estaciones del grupo.

Los resultados muestran que nuestra propuesta cumple el objetivo inicial de adaptar la velocidad de transmisión en multicast. Además, se ha demostrado que, manteniendo un nivel de rendimiento similar al ofrecido por el mecanismo multicast clásico y por DMS, se consigue reducir drásticamente el tiempo de ocupación del canal y la cantidad de datos que se transmiten por la red.

## VII. TRABAJO FUTURO

Esta nueva línea de investigación trae consigo una amplia cantidad de trabajo. Entre todo ello, resulta importante realizar una batería de pruebas más amplia que permita determinar si existen intervalos de trabajo más óptimos para *MCast*. Igualmente, se plantea un análisis más profundo de los resultados con el objetivo de optimizar el algoritmo y alcanzar o superar así el rendimiento ofrecido por DMS.

En relación con lo anterior, se incluye como un trabajo próximo la evaluación del enfoque de *MCast* dirigido a reducir aún más si cabe el *overhead* introducido en la red. Por último, se plantean propuestas que permitan la movilidad y migración de las estaciones dentro del entorno mostrado.

## AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo ha sido financiado conjuntamente por el Ministerio de Economía y Competitividad y la Comisión Europea bajo el proyecto TIN2015-66972-C5-2-R (MINECO/FEDER) y la

beca BES-2013-065457.

## REFERENCES

- [1] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," ANSI/IEEE Std 802.11, 2012.
- [2] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 7: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS)," ANSI/IEEE Std 802.11e, 2005.
- [3] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 3: MAC Enhancements for Robust Audio Video Streaming," ANSI/IEEE Std 802.11aa, 2011.
- [4] Nick McKeown, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulkar, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008.
- [5] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 8: Local and Metropolitan Area Networks," ANSI/IEEE Std 802.11v, 2011.
- [6] Joy Kuri and Sneha Kumar Kasera, "Reliable Multicast in Multi-Access Wireless LANs," *Wireless Networks*, pp. 359–369, 2001.
- [7] J. Villalón, P. Cuenca, Y. Seok L. Orozco-Barbosa, and T. Turetli, "ARSM: a cross-layer auto rate selection multicast mechanism for multi-rate wireless LANs," *IET Communications*, vol. 1, no. 5, pp. 893–902, 2007.
- [8] J. Villalón, P. Cuenca, Y. Seok L. Orozco-Barbosa, and T. Turetli, "Crosslayer Architecture for Adaptive Video Multicast Streaming over Multirate Wireless LANs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 699–711, 2007.
- [9] Y. Park, Y. Seok, N. Choi, Y. Choi, and J.-M. Bonnin, "Rate-adaptive multimedia multicasting over IEEE 802.11 wireless LAN," pp. 178–182, 2006.
- [10] Kandaraj Piamrat, Adlen Ksentini, Jean-Marie Bonnin, and Cesar Viho, "Q-DRAM: QoE-Based Dynamic Rate Adaptation Mechanism for Multicast in Wireless Networks," pp. 1–6, 2009.
- [11] H. Moura, G. V. C. Bessa, M. A. M. Vieira, and D. F. Macedo, "Ethanol: Software defined networking for 802.11 Wireless Networks," in *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*, 2015, pp. 388–396.
- [12] Lalith Suresh, Julius Schulz-Zander, Ruben Merz, Anja Feldmann, and Teresa Vazao, "Towards Programmable Enterprise WLANs with Odin," in *Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks*, 2012, pp. 115–120.
- [13] Shahin Tajik and Ahmad Rostami, "MultiFlow: Enhancing IP Multicast over IEEE 802.11 WLAN," in *IFIP Wireless Days, WD 2013*, 2013, pp. 1–8.
- [14] R. Riggio, M. K. Marina, J. Schulz-Zander, S. Kuklinski, and T. Rasheed, "Programming abstractions for software-defined wireless networks," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pp. 146–162, 2015.
- [15] Eddie Kohler, Robert Morris, Benjie Chen, John Jannotti, and M. Frans Kaashoek, "The Click Modular Router," *ACM Trans. Comput. Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 263–297, 2000.
- [16] B. Pfaff, J. Pettit, T. Koponen, K. Amidon, M. Casado, and S. Shenker, "Extending Networking into the Virtualization Layer," in *Proc. of workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-VIII)*, 2009.
- [17] Dong Xia, Jonathan Hart, and Qiang Fu, "Evaluation of the Minstrel rate adaptation algorithm in IEEE 802.11g WLANs," in *IEEE International Conference on Communications*, 2013, pp. 2223–2228.
- [18] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs," ANSI/IEEE Std 802.11k, 2008.
- [19] M. I. Sanchez and A. Boukerche, "On IEEE 802.11K/R/V amendments: Do they have a real impact?," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 48–55, 2016.
- [20] "Scapy packet sniffer project," 2016.
- [21] "FFmpeg project," 2016.