

Gestión de la movilidad de usuarios basada en SDN para aplicaciones multicast en WLANs

Estefanía Coronado¹, Roberto Riggio², José Villalón¹, Antonio Garrido¹

Resumen— El crecimiento en la demanda de servicios multimedia en *streaming* está aumentando el interés en las comunicaciones en modo multicast en WLANs (*Wireless Local Area Networks*). Sin embargo, en este tipo de redes las transmisiones multicast plantean varios desafíos, tales como bajas tasas de transmisión y problemas en la coexistencia con otras transmisiones. Las enmiendas como IEEE 802.11aa han introducido nuevos esquemas de entrega para mejorar el nivel de fiabilidad en modo multicast. Sin embargo, su uso e implementación queda libre para el programador. En este artículo presentamos *SDN@Play Mobile* como una nueva solución basada en SDN (*Software Defined Networking*) para la gestión conjunta de la movilidad de usuarios y la adaptación de caudal en modo multicast en redes Wi-Fi. Este esquema se basa en una nueva abstracción que permite al controlador SDN configurar el caudal de transmisión en función de las condiciones de la red. La evaluación experimental llevada a cabo en un escenario real demuestra que este algoritmo proporciona mejoras significativas en términos de rendimiento y utilización de canal en comparación con los esquemas multicast incluidos en el estándar.

Palabras clave— IEEE 802.11, SDWN, WLANs, multicast, multimedia, movilidad, migración.

I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas y móviles están experimentando un crecimiento exponencial. Entre estas comunicaciones cabe destacar el papel desempeñado por las aplicaciones multimedia dirigidas a un grupo de usuarios (transmisiones multicast). Sin embargo, debido a la naturaleza estocástica del medio, el soporte apropiado de las comunicaciones en modo multicast resulta bastante complejo.

El estándar IEEE 802.11 [1] lleva a cabo la selección dinámica de distintos esquemas de modulación y codificación para la transmisión de tramas. Por ejemplo, en el caso de redes 802.11a/g esta selección da como resultado velocidades de transmisión que oscilan entre 1 y 54 Mb/s. Sin embargo, este mecanismo está restringido a comunicaciones en modo unicast debido a la falta de confirmaciones en las transmisiones multicast. Como consecuencia, las tramas en modo multicast se transmiten utilizando la tasa básica. Este hecho trae consigo varios inconvenientes: (i) el rendimiento de las aplicaciones se limita seriamente, (ii) se consume una mayor cantidad de recursos de la red y que perjudica otras transmisiones simultáneas, y (iii) la fiabilidad de las transmisiones multicast se ve significativamente afectada.

La enmienda IEEE 802.11aa [2] introduce mejoras de fiabilidad en multicast por medio de un conjunto de esquemas de retransmisión. Sin embargo, no es capaz de dar solución a todas las limitaciones, como son la adaptación de caudal o la movilidad de usuarios. Las redes basadas en SDN (*Software Defined Networking*) han surgido recientemente como una nueva forma de abstracción en el hardware de la red que permite separar claramente el plano de control del plano de datos. La introducción de abstracciones de programación de alto nivel permite desplazar gran parte de la lógica de la red hacia un controlador central y simplificar la gestión de la misma. Sin embargo, aunque este paradigma se ha impuesto en el dominio cableado con soluciones basadas en OpenFlow [3], aquellas dirigidas a redes inalámbricas han empezado a aparecer recientemente [4], [5].

En este artículo se propone un mecanismo para la gestión de la movilidad de usuarios basada en la adaptación de caudal en multicast para WLANs definidas por software. Nuestro trabajo tiene como objetivo mejorar la calidad de experiencia de las comunicaciones multicast, a la vez que optimizar la utilización de recursos físicos. Este objetivo se logra mediante la adaptación adecuada de la velocidad de transmisión, y la asociación dinámica de los receptores multicast de manera que pueda maximizarse el rendimiento global de la red.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. En la Sección II se analizan los trabajos relacionados. La Sección III presenta la arquitectura del sistema, así como los algoritmos de gestión de la movilidad y de adaptación de caudal. Los resultados de la evaluación experimental se presentan en la Sección IV. Por último, en la Sección V se exponen las conclusiones extraídas y los trabajos futuros.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Las comunicaciones multicast son una manera eficiente de enviar la misma información a un grupo de estaciones. Sin embargo, estas comunicaciones carecen de confirmaciones y retransmisiones de paquetes. Como consecuencia, la fiabilidad de la transmisión es muy reducida. Además, la falta de *feedback* hace imposible adaptar la velocidad de transmisión, por lo que se recurre al empleo de la tasa básica de envío.

La enmienda IEEE 802.11aa pretende mejorar el rendimiento y la fiabilidad de las aplicaciones multicast, introduciendo para ello el servicio GATS (*Group Addressed Transmission Service*). Este servicio especifica varias políticas de retransmisión y se compone de dos mecanismos diferentes: DMS (*Direct Multicast Service*) y GCR (*Groupcast with Re-*

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

²FBK CREATE-NET. Trento (Italia), e-mail: rriggio@fbk.eu

tries). DMS transforma cada trama multicast en tantas tramas unicast como receptores se encuentren en el grupo multicast. Así, cada trama unicast puede retransmitirse tantas veces como sea necesario hasta que el AP (*Access Point*) reciba el ACK o se alcance el límite de retransmisiones. No obstante, a pesar de su fiabilidad, este método presenta graves problemas de escalabilidad. Por su parte, GCR está compuesto por tres métodos de retransmisión: *Legacy Multicast*, UR (*Unsolicited Retries*) y BACK (*Block ACK*). El modo *Legacy Multicast* es el definido en el estándar IEEE 802.11 original. Con el fin de aumentar la fiabilidad de la entrega, UR realiza automáticamente N reintentos, de forma que un mismo paquete es finalmente transmitido $N + 1$ veces. Sin embargo, UR podría retransmitir algunas tramas de forma innecesaria, aumentando así la utilización de la red. En BACK, el AP acuerda con los receptores multicast el número de paquetes consecutivos que van a ser confirmados. Tras esto, el AP envía una ráfaga de paquetes multicast hasta alcanzar este número y solicita un ACK en bloque a cada receptor. Esta solicitud y los ACK correspondientes se envían en modo unicast. A pesar de reducir el tráfico de control, este mecanismo tampoco escala con el número de receptores en el grupo. En [6] se puede encontrar una descripción completa de estos esquemas multicast.

La adaptación de caudal en multicast puede llevarse a cabo mediante mecanismos que permitan obtener información acerca del estado del medio inalámbrico. Los esquemas basados en líder o LBP (*Leader-Based Protocols*) son frecuentemente encontrados en la literatura. LBP [7] selecciona como líder del grupo al receptor multicast con peor calidad de señal, siendo éste el único encargado de enviar las confirmaciones al transmisor. Sin embargo, no se proporciona un procedimiento para la selección del líder. El algoritmo ARSM (*Auto Rate Selection Multicast*) [8] divide su modo de funcionamiento en dos fases: en la primera de ellas se selecciona el líder del grupo, mientras que en la segunda se obtiene la relación señal-ruido o SNR (*Signal to Noise Ratio*) a partir de los ACKs del líder del grupo, la cual es empleada para adaptar la velocidad de transmisión. H-ARSM (*Hierarchical-ARSM*) [9] es una evolución de ARSM destinada a transmisiones de vídeo jerárquico que garantiza una calidad mínima de la secuencia de vídeo para todos los receptores. La adaptación de caudal basada en SNR también es utilizada en SARM (*SNR-based Auto Rate for Multicast*) [10], donde el AP identifica al peor receptor mediante el envío de tramas *beacon* a las estaciones, las cuales deben responder indicando su valor SNR. Tras ello, el AP da a conocer la información del nuevo líder a todos los receptores.

La calidad de experiencia o QoE (*Quality of Experience*) ha sido a menudo utilizada como base para adaptar la velocidad de las aplicaciones multimedia. En [11] se presenta una red neuronal diseñada para construir un modelo que mapea mediciones de QoE en velocidades de transmisión. Por otro lado, PSQA

(*Pseudo Subjective Quality Assessment*) se presenta como una métrica híbrida objetivo-subjetiva que simula cómo los seres humanos perciben los errores en las transmisiones de vídeo. En [12] los autores hacen un esfuerzo para llevar a cabo la transmisión de vídeo en un entorno real de pruebas. La propuesta se divide en dos periodos: un periodo de transmisión y un periodo de sondeo. Durante la fase de transmisión, las estaciones recogen los números de secuencia de las tramas recibidas. Tras esto, el AP utiliza esta información para calcular el éxito de la entrega. Finalmente, el caudal de transmisión se selecciona comparando estos valores con aquellos obtenidos en las dos rondas anteriores.

La adaptación de caudal se complica aún más cuando se consideran receptores móviles. Algunas técnicas eficientes de migración entre APs para tráfico multicast se presentan en [13], [14]. Por último, en [15], [16] este problema es analizado desde el punto de vista de la conexión cableada que existe entre los APs. Estos trabajos se centran en el balanceo de carga entre estos sin tener en cuenta los problemas que surgen a nivel MAC (*Media Access Control*).

Algunos trabajos basados en SDN tratan igualmente de ofrecer soporte a la movilidad. En BigAP [17] cada AP trabaja en un canal distinto y todos ellos comparten un solo BSSID, de modo que al realizar la migración de un cliente, éste se desplaza de un AP a otro tan sólo cambiando el canal percibido por el cliente. Aunque el tiempo necesario se reduce, el algoritmo necesita un gran número de canales disponibles e imposibilita el uso de la política Block-ACK. En M-SDN [18] el controlador central analiza la información de calidad de canal para identificar los mejores APs para realizar la migración de un cliente y calcular la ruta hasta ellos. Este enfoque reduce el tiempo de interrupción del servicio, pero introduce tráfico adicional en la red. Una arquitectura multicanal se presenta en [19], donde todos los APs comparten la misma dirección MAC para asegurar una migración sin interrupciones. El rendimiento de este esquema se evalúa a través tanto de simulación como de un escenario de pruebas real basado en OpenFlow. Sin embargo, no se considera la movilidad de los clientes.

A pesar de las mejoras realizadas, la mayoría de los trabajos anteriores han sido simplemente evaluados mediante simulaciones o requieren modificaciones significativas, lo que los hace incompatibles con el estándar IEEE 802.11. Además, el problema de la movilidad de usuarios se agrava aún más en las comunicaciones multicast dado que velocidad de transmisión es común para todos los receptores del grupo. En este sentido, ningún trabajo de investigación en la literatura aborda este problema en WLANs basadas en SDN. Por ello, en este artículo se presenta un esquema práctico para la adaptación de caudal en multicast y la gestión de la movilidad, el cual es compatible con el estándar IEEE 802.11 y totalmente programable, por lo que puede adaptarse a los requisitos de cualquier aplicación multimedia.

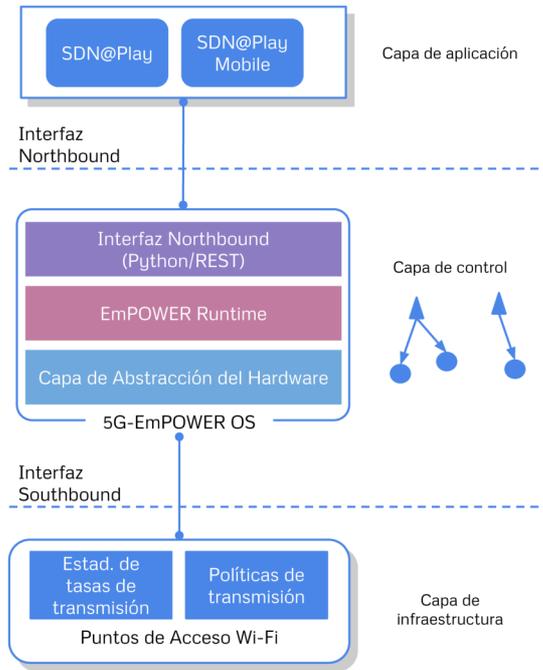


Fig. 1: Arquitectura del sistema *SDN@Play Mobile*

III. DISEÑO DEL SISTEMA

Las tecnologías de red actuales presentan problemas que a menudo requieren realizar cambios sustanciales en la arquitectura. El paradigma SDN trata de abordar tales limitaciones mediante la introducción de una red modular y programable. La Figura 1 muestra la arquitectura del sistema utilizada en este trabajo, donde pueden diferenciarse tres capas distintas: infraestructura, control y aplicación. La capa de infraestructura incluye los dispositivos de red del plano de datos, la cual está en constante comunicación con el controlador de la red, situado en la capa de control. Las aplicaciones SDN se ejecutan en la capa de aplicación para implementar la lógica de la red, aprovechando la información obtenida por el controlador central.

Como se indicó previamente, OpenFlow es una de las opciones más ampliamente adoptadas para implementar el enlace entre el plano de datos y el plano de control (también conocido como interfaz *Southbound*). Sin embargo, este protocolo está dirigido a redes cableadas y resulta poco apropiado para el control de redes inalámbricas [4]. Como consecuencia, en los últimos años han surgido varias soluciones SDN para redes inalámbricas y móviles, como 5G-EmPOWER [4] y Odin [5].

En este trabajo se toma como referencia la plataforma 5G-EmPOWER [4]. No obstante, cabe señalar que nuestro esquema es totalmente general y puede aplicarse sobre cualquier WLAN basada en SDN.

A. Esquema de Adaptación de Caudal en Multicast

El algoritmo para la adaptación del caudal de transmisión en comunicaciones multicast, *SDN@Play*, ha sido previamente presentado en un trabajo previo de los autores [20]. La idea de

SDN@Play es utilizar las estadísticas de entrega de las confirmaciones recogidas por el algoritmo de adaptación de caudal implementado en el AP para calcular dinámicamente la velocidad de transmisión utilizado para las comunicaciones multicast en modo *Legacy*. Sin embargo, el algoritmo implementado por defecto en los APs tan sólo puede ser empleado en transmisiones unicast. Por tanto, esta información estadística no podría obtenerse de no existir transmisiones en modo unicast entre un AP y una estación. Por esta razón, el modo de funcionamiento de *SDN@Play* está dividido en dos fases.

Durante la *primera fase* el controlador define DMS como política de retransmisión para una dirección específica. Se recuerda que, este modo reemplaza una trama multicast por tantas tramas unicast como receptores se encuentren en un grupo. Esto permite al algoritmo recopilar la información estadística de todos los receptores del grupo. En la *segunda fase*, el controlador usa estas estadísticas para calcular el MCS (*Modulation and Coding Scheme*) con la probabilidad de entrega exitosa más alta para cada receptor del grupo. Tras ello, se sigue un enfoque basado en *el peor receptor* para calcular el caudal óptimo de transmisión.

Todo el proceso, mostrado en la Figura 2, se repite periódicamente con una relación configurable entre los periodos de DMS y de *Legacy*. Así, al aumentar la fracción de tiempo del modo DMS, es posible mejorar la fiabilidad de las transmisiones, pero provocando una utilización de canal más alta. Por contra, al aumentar el periodo de tiempo del modo *Legacy*, se consigue reducir la ocupación de canal a cambio de una menor fiabilidad en las comunicaciones, especialmente si las condiciones del medio no son estables.

Basándose en las estadísticas de enlace mencionadas anteriormente, se calcula la velocidad de transmisión óptima para un grupo multicast dado. Sea M el conjunto de receptores multicast, U el conjunto de APs, y R el conjunto de velocidades de transmisión soportados por cada receptor multicast. Además, sea $P_{n,r}^{n'}$ la probabilidad de entrega exitosa entre el AP $n \in U$ y el receptor $n' \in M$ al usar el MCS $r \in R$. Así, el conjunto de tasas de transmisión válidas para el AP $n \in U$, R_{valid}^n , puede definirse como sigue:

$$R_{valid}^n = \bigcap_{i=1}^{n'} \left\{ r \in R \mid P_{n,r}^{n'} > r_{th} \right\} \quad \forall n \in U \quad (1)$$

Este conjunto incluye aquellos MCS cuya probabilidad de entrega exitosa supera el umbral r_{th} para todos los receptores de un grupo conectados a un AP dado. Es decir, cualquiera de las tasas de transmisión consideradas en este conjunto contaría con una probabilidad de éxito de al menos r_{th} . En esta línea, la tasa de transmisión óptima R_{opt}^n finalmente se calcula tal y como se muestra a continuación:

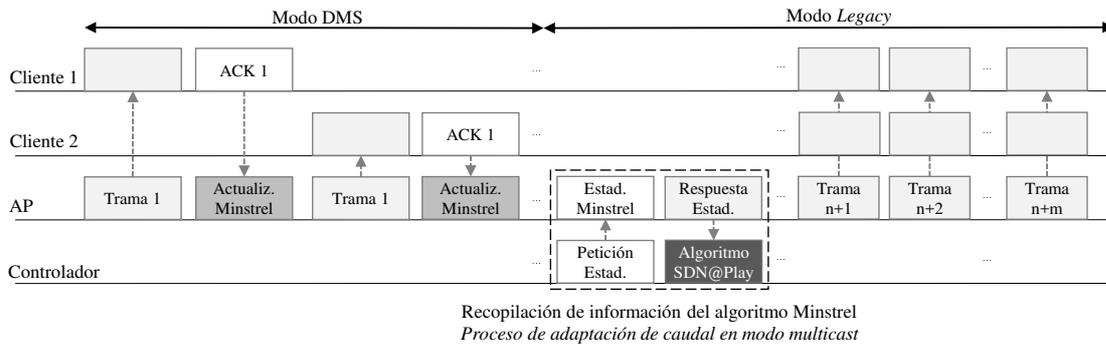


Fig. 2: Funcionamiento de *SDN@Play*

$$R_{opt}^n = \begin{cases} \max(R_{valid}^n) & \text{if } R_{valid} \neq \emptyset \\ \min\left(\bigcap_{i=1}^{n'} \arg\max_r(P_{n,r}^{n'})\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Este enfoque asegura que la velocidad de transmisión seleccionada cuenta con una alta probabilidad de entrega exitosa incluso para los receptores con peores condiciones de canal. En caso de que ninguna tasa de transmisión cuente con una probabilidad de entrega exitosa superior al umbral establecido para algún cliente de la red, nuestro algoritmo selecciona para cada receptor el índice MCS con la probabilidad más alta y, a partir de este conjunto, selecciona aquel MCS más bajo. Con ello, se pretende asegurar que la información pueda ser recibida por todos los receptores del grupo multicast.

B. Mecanismo de Gestión de la Movilidad

La distancia e interferencia entre clientes y APs puede afectar el rendimiento de las comunicaciones y obligar a los APs a usar velocidades de transmisión menos eficientes. Este hecho puede desembocar en una mayor utilización del medio inalámbrico y en un mayor número de paquetes perdidos en la red.

SDN@Play Mobile pretende optimizar la movilidad de las estaciones y la selección del caudal de transmisión en multicast, mientras que se minimiza la ocupación de canal. Así, los receptores multicast comunican de forma periódica al AP al que se encuentran conectados la lista de APs vecinos junto con la calidad de canal percibida¹. Esta información se recopila mediante el empleo de *Beacon Reports* definidos en la enmienda IEEE 802.11k [21]. Los clientes monitorizan los valores de señal percibida en las tramas *beacon* de los APs en su área de cobertura y los comunican a su AP actual por medio de un *Beacon Report*. Finalmente, los APs envían esta información al controlador con el objetivo de construir un mapa de calidad de señal global de la red.

Para cada receptor multicast, el controlador comprueba periódicamente las distintas calidades de canal recibidas. En caso de que la potencia de la señal

¹El valor RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) se ha usado para estimar la calidad de canal. Sin embargo, pueden utilizarse otros indicadores como la pérdida de paquetes.

entre el cliente y el AP actual se encuentre por debajo de -75 dB o de que otro AP posea una mejor calidad de canal en al menos 20 dB de diferencia, se lleva a cabo la migración del cliente.

Sea $S(u) \subset M$ el conjunto de receptores conectados al AP $u \in U$. Igualmente, sea ρ_u^m la calidad de canal entre el receptor multicast $m \in M$ y el AP $u \in U$. Entonces, es posible realizar los siguientes cálculos:

$$\rho(u) = \frac{\sum_{m \in S(u)} \rho_u^m}{|S(u)|} \quad (3)$$

$$\sigma(u) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m \in S(u)} (\rho_u^m - \rho(u))^2} \quad (4)$$

Siendo $\rho(u)$ la calidad de canal media de los actuales receptores del AP u , y $\sigma(u)$ la correspondiente desviación estándar, el controlador crea a partir de esta información una lista de AP candidatos, $\Omega(m)$, a la hora de realizar una migración. De este modo, los APs candidatos para el receptor multicast m quedan recogidos tal y como sigue:

$$\Omega(m) = \{u \in U | \rho(u) - \sigma(u) \leq \rho_u^m \leq \rho(u) + \sigma(u)\} \quad (5)$$

Esta lista recoge aquellos APs cuyos receptores tienen una calidad de canal similar a la que la estación m tendría de realizarse la migración hacia ese AP. Con esto, se pretende que los APs sirvan grupos de receptores lo más homogéneos posible en términos de calidad de señal. Nótese cómo si un AP u no se encuentra en el área de cobertura del receptor multicast m , entonces $\rho_u^m = +\infty$.

Una vez finalizado este proceso, el controlador selecciona el AP con la mejor calidad de canal en $\Omega(m)$ para el receptor multicast m . Tras realizar la migración de la estación, *SDN@Play* recalcula la velocidad de transmisión para todos los APs de la red. Si como resultado de esta migración, la ocupación de canal global de la red aumenta, esta migración es automáticamente revertida. Para evitar oscilaciones, en caso de revertir una migración, el AP afectado no se considerará como candidato para la estación en cuestión durante las siguientes 5 iteraciones del algoritmo.

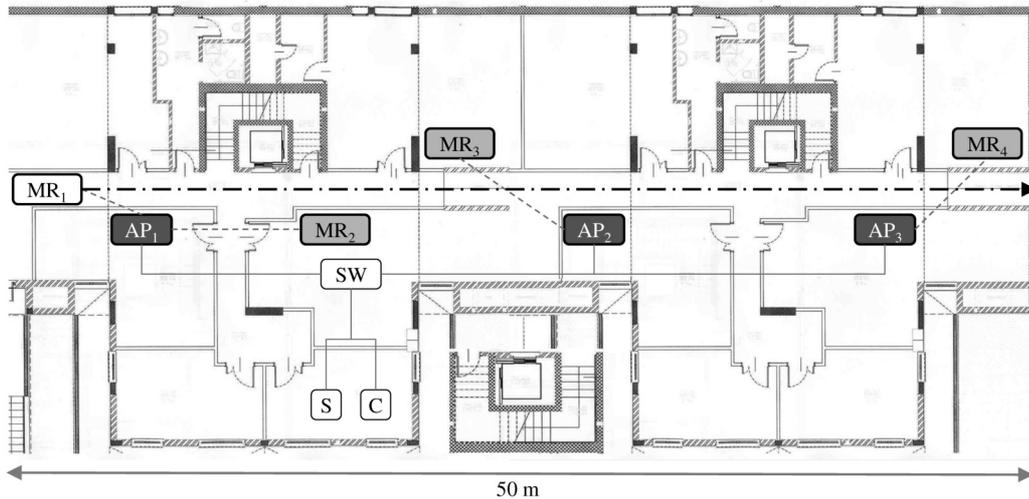


Fig. 3: Escenario de pruebas utilizado

IV. EVALUACIÓN DE PRESTACIONES

La evaluación de prestaciones se ha llevado a cabo en un escenario real con el objetivo de comparar *SDN@Play Mobile*, con el esquema multicast del estándar IEEE 802.11, así como con nuestro trabajo anterior *SDN@Play* [20]. La evaluación realizada en [20] muestra cómo *SDN@Play* reduce la utilización del medio en hasta un 80% manteniendo la calidad de las transmisiones. Sin embargo, este análisis se basa en el uso de estaciones estáticas conectadas a un sólo AP. Por ello, en este artículo se evalúa el rendimiento *SDN@Play Mobile* empleando un escenario mayor, donde se añaden estaciones móviles.

A. Metodología de evaluación

El escenario de pruebas utilizado durante la evaluación experimental se muestra en la Figura 3. Este escenario está compuesto por cuatro receptores multicasting (MR_i), 3 APs (AP_j), un controlador (C), un servidor de vídeo (S), y un switch ethernet (SW). El receptor multicasting MR_1 es una estación móvil, mientras que el resto permanecen fijas.

Durante las mediciones los receptores $MR_{2,3,4}$ han permanecido en la misma posición, mientras que el receptor MR_1 se desplaza a lo largo de un pasillo de 50 m de longitud. El receptor MR_1 se localiza inicialmente cerca del AP_1 en un extremo del pasillo, el cual avanza hasta su posición final al otro lado del pasillo. Este pasillo se divide en 10 segmentos de igual longitud. Al final de cada uno de estos segmentos, la estación se detiene durante 20 s, lo que resulta en una velocidad media de 0,2 m/s.

Los APs están compuestos por placas PC Engines ALIX 2D (x86), equipados con una sola interfaz Wi-Fi (chipset Atheros AR9220) y utilizan OpenWRT (15.05.01) como sistema operativo. Todas las pruebas se realizan en la banda de 5GHz (IEEE 802.11a). Tanto el controlador como los receptores multicasting son ordenadores portátiles equipados con una CPU Intel i7 y 8GB de RAM, teniendo Ubuntu 16.04.1 como sistema operativo.

Durante las pruebas, se genera un flujo de vídeo multicast por parte del servidor S . Esta aplicación consiste en una secuencia de vídeo de cinco minutos codificada usando HEVC (*High Efficiency Video Coding*) [22] y transmitida usando FFmpeg [23]. Además, se consideran dos esquemas de codificación distintos dando lugar a tasas de bits de 1,2 Mb/s y 6,2 Mb/s. Así, es posible comprobar cómo diferentes cargas de red afectan al rendimiento de los esquemas.

En este estudio se han considerado tres esquemas multicast: *Legacy Multicast*, *SDN@Play*, y *SDN@Play Mobile*. Como métricas de evaluación se han empleado el rendimiento normalizado y la utilización de canal. Debido al uso de la capa física IEEE 802.11a, el esquema *Legacy Multicast* emplea la tasa básica de 6 Mb/s. En el caso de *SDN@Play*, el algoritmo ha sido configurado para funcionar en modo DMS durante 500ms y en modo *Legacy* durante 2500ms. Tras finalizar cada prueba se han eliminado los datos estadísticos. Además, en la red no existe ninguna transmisión más aparte de la aplicación multicast, por lo que la única oportunidad de ejecutar el algoritmo de adaptación de caudal en modo unicast es durante los periodos de DMS. Cada prueba se ha repetido 5 veces para evitar fluctuaciones.

B. Resultados

La Figura 4 muestra el rendimiento multicast normalizado de cada receptor utilizando distintos esquemas. Como puede apreciarse, el rendimiento de los receptores estáticos (MRs 2-4) no se ve afectado a 1,2 Mb/s, independientemente del esquema utilizado. Por el contrario, *SDN@Play* y *SDN@Play Mobile* aumentan significativamente el rendimiento del receptor móvil (MR_1) debido a que *Legacy Multicast* no puede adaptarse a los cambios en el canal sufridos por este receptor. Además, dada la ausencia de ACKs y retransmisiones, esta estación comienza a experimentar grandes pérdidas de paquetes a medida que se aleja de AP_1 . No obstante, *SDN@Play* no soporta la movilidad de los usuarios y, como resul-

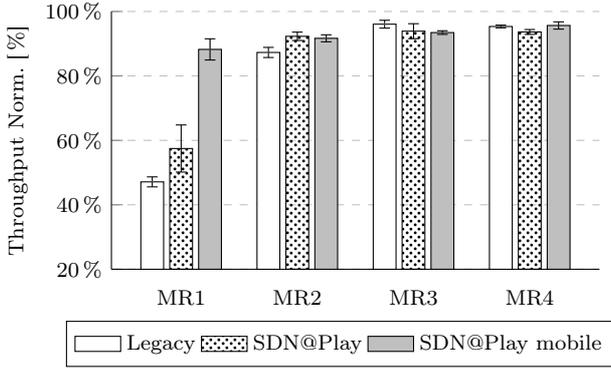


Fig. 4: Rendimiento multicast normalizado de la transmisión de vídeo a 1,2 Mb/s para cada receptor

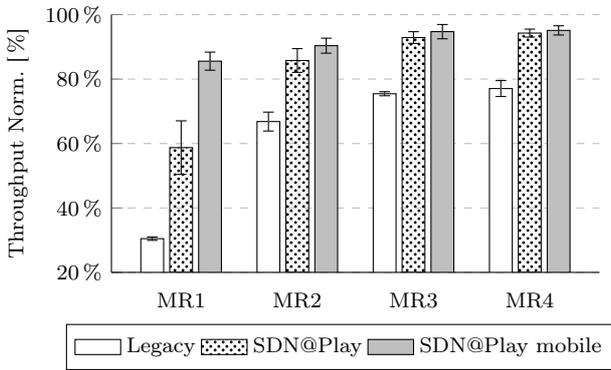


Fig. 5: Rendimiento multicast normalizado de la transmisión de vídeo a 6,2 Mb/s para cada receptor

tado, la estación móvil permanece conectada al AP inicial hasta que pierde la conexión y vuelve a realizar el proceso de asociación con otro AP. Por contra, *SDN@Play Mobile* mejora significativamente el rendimiento de la estación móvil. Este hecho es posible ya que dicha estación se conecta en cada momento al AP que ofrece los mejores resultados en términos de tasa de pérdida de paquetes y utilización de canal.

En la Figura 5 puede observarse el rendimiento normalizado de la aplicación de vídeo al aumentar la tasa de transmisión hasta 6,2 Mb/s. En el caso de *Legacy Multicast*, este cambio conlleva una caída brusca en las prestaciones de todos los receptores multicast. Esta caída es especialmente significativa en el caso de la estación móvil, la cual logra un rendimiento del 30%. Por el contrario, *SDN@Play* muestra un rendimiento similar al de la evaluación anterior para los receptores estáticos. Finalmente, *SDN@Play Mobile* es capaz de mejorar las prestaciones del receptor móvil en un 180%, ofreciendo unas cifras similares a las pruebas realizadas con una tasa de bits de 1,2 Mb/s.

El hecho de que *Legacy Multicast* utilice la tasa básica de transmisión tiene como consecuencia una alta ocupación del medio inalámbrico. Como puede verse en la Figura 6, la utilización del canal para el flujo de vídeo de 1,2 Mb/s ronda el 20%, mientras que en el caso de la transmisión de 6,2 Mb/s (Figura 7) esta cifra alcanza el 90%, lo que conlleva que

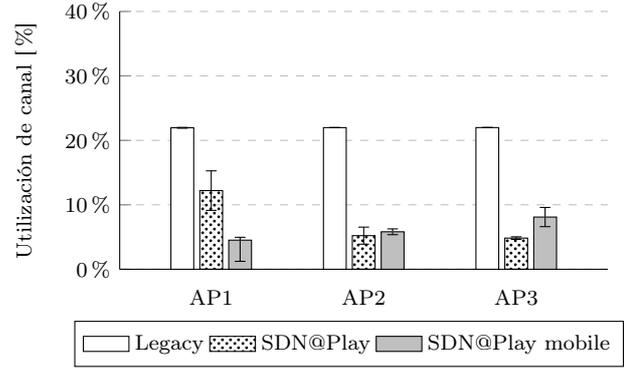


Fig. 6: Utilización de canal por AP para una transmisión de vídeo de 1,2 Mb/s

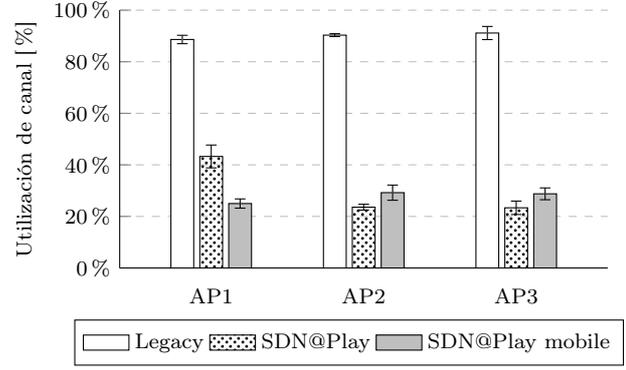


Fig. 7: Utilización de canal por AP para una transmisión de vídeo de 6,2 Mb/s

una gran parte de la aplicación de vídeo no pueda ser transmitida. Mediante el uso de velocidades de transmisión más altas, *SDN@Play* disminuye de forma efectiva el tiempo de ocupación del medio tanto para los receptores estáticos como para los móviles. Esta mejora es aún más significativa en el caso de *SDN@Play Mobile*. De hecho, a diferencia de su predecesor, este esquema solventa de un modo eficaz los problemas del receptor móvil, optimizando la utilización del canal y equilibrando la carga de tráfico en toda la red.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se propone un nuevo esquema de gestión de la movilidad de usuarios basada en la adaptación del caudal de transmisión en multicast para WLANs. El enfoque basado en SDN permite disponer de una visión global de la red a través del controlador central, la cual se utiliza para coordinar las operaciones de los distintos APs. El esquema propuesto, denominado *SDN@Play Mobile*, optimiza conjuntamente la selección de la velocidad de transmisión en multicast y la movilidad y reasociación de receptores multicast con el objetivo de reducir la utilización de recursos del medio y mantener una calidad de experiencia adecuada.

SDN@Play Mobile ha sido implementado y evaluado sobre una plataforma real de pruebas como

es 5G-EmPOWER. La evaluación de prestaciones demuestra que nuestro esquema ofrece una mejora significativa en términos de utilización de canal en comparación con el mecanismo multicast definido en 802.11, manteniendo al mismo tiempo la compatibilidad con los terminales inalámbricos del mercado.

Como trabajo futuro se plantea extender *SDN@Play Mobile* para dar soporte a varios grupos multicast, así como para usar otras características disponibles en las recientes enmiendas de IEEE 802.11, tales como Block-ACK. Por último, se considera igualmente ampliar el trabajo al segmento cableado de la red.

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, y el Plan de Investigación e Innovación H2020 bajo la beca H2020-ICT-671639 (COHERENT).

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 3: MAC Enhancements for Robust Audio Video Streaming,” ANSI/IEEE Std 802.11aa, 2011.
- [3] 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.
- [4] 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*, vol. 12, no. 2, pp. 146–162, 2015.
- [5] Lalith Suresh, Julius Schulz-Zander, Ruben Merz, Anja Feldmann, and Teresa Vazao, “Towards Programmable Enterprise WLANs with Odin,” in *Proc. of ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, New York, 2012.
- [6] Yousri Daldoul, Djamel-Eddine Meddour, Toufik Ahmed, and Raouf Boutaba, “Performance and scalability evaluation of IEEE 802.11v/aa multicast transport,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 14, pp. 1987–2000, 2016.
- [7] J. Kuri and S. K. Kasera, “Reliable multicast in multi-access wireless LANs,” in *Proc. of IEEE Conference on Computer and Communications Societies*, New York, 1999.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Y. Park, Y. Seok, N. Choi, Y. Choi, and J.-M. Bonnin, “Rate-adaptive multimedia multicasting over IEEE 802.11 wireless LAN,” in *Proc. of IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, 2006.
- [11] Kandaraj Piamrat, Adlen Ksentini, Jean-Marie Bonnin, and Cesar Viho, “Q-DRAM: QoE-Based Dynamic Rate Adaptation Mechanism for Multicast in Wireless Networks,” in *Proc. of IEEE Global Communications Conference*, Honolulu, 2009.
- [12] S. Paris, N. Facchi, F. Gringoli, and A. Capone, “An Innovative Rate Adaptation Algorithm for Multicast Transmissions in Wireless LANs,” in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, Dresden, 2013.
- [13] M. F. Tuysuz and H. A. Mantar, “A novel energy-efficient QoS-aware handover scheme over IEEE 802.11 WLANs,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, Sydney, 2013, pp. 1045–1049.
- [14] H. Zhang, Z. Lu, X. Wen, and Z. Hu, “QoE-Based Reduction of Handover Delay for Multimedia Application in IEEE 802.11 Networks,” *IEEE Transactions on Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1873–1876, 2015.
- [15] S. K. Dandapat, B. Mitra, R. R. Choudhury, and N. Ganguly, “Smart Association Control in Wireless Mobile Environment Using Max-Flow,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 9, no. 1, pp. 73–86, 2012.
- [16] A. Sarma, S. Chakraborty, and S. Nandi, “Context Aware Handover Management: Sustaining QoS and QoE in a Public IEEE 802.11e Hotspot,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 11, no. 4, pp. 530–543, 2014.
- [17] A. Zubow, S. Zehl, and A. Wolisz, “BIGAP - Seamless handover in high performance enterprise IEEE 802.11 networks,” in *Proc. of IEEE Network Operations and Management Symposium*, Istanbul, 2016.
- [18] C. Chen, Y. T. Lin, L. H. Yen, M. C. Chan, and C. C. Tseng, “Mobility management for low-latency handover in SDN-based enterprise networks,” in *Proc. of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking*, Doha, 2016, pp. 1–6.
- [19] K. Nakauchi and Y. Shoji, “WiFi Network Virtualization to Control the Connectivity of a Target Service,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 12, no. 2, pp. 308–319, 2015.
- [20] Estefania Coronado, Roberto Riggio, Jose Villalón, and Antonio Garrido, “Programming Abstractions for Wireless Multicasting in Software-Defined Enterprise WLANs,” in *Proc. of IEEE International Symposium on Integrated Network Management*, Lisbon, 2017.
- [21] “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.
- [22] ISO/IEC and ITU-T, “High Efficiency Video Coding (HEVC). ITU-T Recommendation H.265 and ISO/IEC 23008-2 (version 4),” Dec. 2016.
- [23] “FFmpeg project,” [Online]. Available: <https://ffmpeg.org/>. [Accessed: 8-May-2017].