



OPEN SOFTWARE DEFINED WIRELESS MESH NETWORK (OPENSOWMN)

STATE OF THE ART | 20.05.2019

1 Introducción

El presente documento trata de aglutinar el background de la investigación en la simbiosis Software Defined Network (SDN) y Wireless Mesh Network (WMN). Presenta ambos conceptos por separado y la investigación creciente por aunarlos. Además, se comentan las arquitecturas y pretensiones de las distintas líneas de investigación existentes hasta la fecha.

2 Software Defined Wireless Mesh Network

2.1 Software Defined Network

En esta sección se define el marco de la tecnología Software Defined Network (SDN), siendo la separación del plano de control y el plano de datos su principal interés. Como hemos mencionado, SDN separa el plano de control del plano de datos e introduce una lógica de gestión de control centralizada (con todo lo que eso conlleva, p. ej., optimización de los recursos de red, mayor adaptabilidad los cambios en la topología de red, etc), referenciada a un controlador SDN. Como resultado, permite que los dispositivos de red tengan un alto grado de simplicidad y que el enrutamiento de los paquetes (plano de datos) pueda ser programado por software. Con todo ello, SDN otorga a las redes mayor flexibilidad y control, de ahí su interés en las redes actuales y futuras.

Relacionado con SDN encontramos OpenFlow (OF), un protocolo "no estandarizado" pero empleado de manera global por la mayoría de los fabricantes. Permite configurar reglas en las tablas de encaminamiento de los switch para la gestión de los paquetes que le llegan, haciendo matching con los campos del mismo. Aunque los aspectos técnicos del funcionamiento del protocolo no son tratados en este documento, es importante mencionar que OF no está pensado para configurar interfaces inalámbricas dado que no es consciente de las tecnologías físicas subyacentes, y sólo puede manejar configuraciones para el plano de datos.

Tradicionalmente la tecnología SDN estaba aplicada exclusivamente a redes cableadas, reduciendo los costes operacionales en data centers. Sin embargo, recientemente se empezó a investigar su posible aplicación en redes inalámbricas.

2.2 Wireless Mesh Network

Las Wireless Mesh Networks (WMN) están formadas por routers mesh configurados en modo ad-hoc que usan antenas omnidireccionales con uno o más radios basados en la tecnología IEEE 802.11. Además, la configuración de la topología y la comunicación de unos con otros se obtiene usando protocolos de enaminamiento distribuidos como Optimized Link State Routing (OLSR) o Better Approach to Mobile Ad Hoc Networking (BATMAN). Según esto, los router mesh trabajan de una forma auto-gestionada sin una visión global, lo que conduce a una mala asignación de recursos de red y a un bajo rendimiento, especialmente en redes a gran escala.

Como hemos mencionado anteriormente, las características de SDN la convierten en una tecnología muy atractiva para mejorar las WMN. Sin embargo, las WMN presentan diversos aspectos no contemplados en las redes cableadas, que hay que considerar para poder aplicar SDN:

- Uso de canales inalámbricos con variaciones en sus parámetros (SNR, modulación, frecuencia, potencias...). Por lo tanto, es necesario la monitorización de los parámetros inalámbricos en las WMN, existiendo dos soluciones como veremos más adelante: (i) extender la funcionalidad el protocolo OF o (ii) integrar otro controlador encargado de la gestión inalámbrica (usando protocolos como SNMP, CAPWAP o NETCONF) y capacitado para comunicarse con el controlador SDN.
- La auto-configuración ha de ser una característica para las WMN, por lo que se necesita un descubrimiento autónomo de la topología y la posibilidad de reconexión en caso de cambiar la red.

2.3 Conclusiones

La combinación de SDN con WMN, referenciado a partir de ahora como Software Defined Wireless Mesh Network (SDWMN), es una tarea compleja que nace ya de la propia naturaleza de los enfoques. SDN describe redes homogéneas, estáticas y con una gestión centralizada; mientras que WMN está caracterizada por el dinamismo y el uso de protocolos de encaminamiento distribuidos. Además, no hay que olvidar el principio de aplicación de SDN; su concepción exclusiva en redes cableadas que provoca nuevos retos por resolver para su uso en redes inalámbricas.

3 Investigaciones en SDWMN

Diferentes proyectos se han ido realizando sobre SDWMN marcados por las pretensiones en los aspectos que se han intentado atender. Encontramos un campo de reciente interés para la comunidad de investigación, donde la primera referencia que nos consta es un proyecto centrado en las QoS dentro del contexto de las redes heterogéneas [1]. No se trata de una referencia muy técnica ya que deja en el aire ciertos aspectos funcionales y de configuración, pero da cuenta de ciertas características en el diseño de la arquitectura de red a considerar como la necesidad de una capa de abstracción para contemplar diferentes tecnologías de la capa física o la clasificación del tráfico en distintas clase para recibir el mismo trato dentro de la red mesh.

A continuación, describimos los investigaciones clave:

- **Dely et al. [3]** extiende la funcionalidad básica de OF para permitir la migración rápida de usuarios entre los Access Points (AP), sin la necesidad de usar túneles (con un proceso de handover más lento). La arquitectura propuesta, una primera aproximación a SDWMN, está formada por nodos mesh y un controlador global, formado a su vez por un Monitoring-Control Server (MCS) y un controlador SDN.

Por un lado, cada nodo mesh es un switch compatible con OF y equipado con una o varias tarjetas de red, donde cada interfaz física esta dividida en dos interfaces virtuales (usando diferentes SSIDs): una para el tráfico de control y otra para el de datos. Las interfaces de control están gobernadas por el protocolo OLSR y las de datos están conectadas al controlador SDN (usando OF). Algo especialmente relevante fue la utilización de un protocolo de encaminamiento dentro de la concepción SDN. La implementación de OLSR permite el descubrimiento de la topología de red estableciendo las conexiones entre los nodos mesh vecinos, y ayuda a reducir el retardo en la comunicación entre el controlador y el plano de control de los nodos mesh. Además, cada nodo cuenta con un fichero de configuración al arrancar, basado en [4], y con un agente local para la gestión de los parámetros inalámbricos.

Por otro lado, en el controlador global, el MCS periódicamente solicita la información obtenida por el protocolo OLSR a los diferentes nodos mesh para construir la topología de red. Además, entre el MCS y el controlador SDN existe comunicación (a través de HTTP/XML), p. ej., para consultar la topología desde el controlador SDN o para avisar de cambios en la red desde el MCS al controlador SDN. También se cuenta con un servidor personalizado (Nagios) para maneja la topología, las asociaciones entre los AP y la monitorización de los cambios para adaptar la red en consecuencia.

- **Salsano et al. [6]** extienden el enfoque de **Detti [5]** para adherir a la arquitectura mayor tolerancia a fallos (particiones de red) en un escenario con múltiples controladores SDN y conectividad poco fiable del canal de control. Según esto, cada nodo mesh cuenta con un fichero de configuración implementado de manera estática con el listado de los controladores ordenados por prioridades. Atendiendo a esta configuración elige quien es el controlador que le gobierna en función de su prioridad y conexión o no con él. También cuentan con un algoritmo para sondear la conexión con otros controladores.

Al igual que en [5], la red cuenta con un plano de control y otro de datos separados por distintos rangos de direcciones IP. A su vez, cada controlador y nodo mesh recibe de manera predefinida y única una dirección IP dentro del rango del plano de control. Bajo esta concepción, el plano de control cuenta con una conectividad IP básica, utilizando el protocolo de encaminamiento OLSR, y el plano de datos el reenvío de paquetes de acuerdo a las reglas instauradas por el controlador SDN. Sirviéndose de la propuesta de [3], este enfoque propone utilizar OLSR como respaldo para enrutar el tráfico de datos en caso de que se pierda la comunicación con el controlador SDN. También la presencia del citado protocolo asegura la reacción adecuada a los eventos de una topología cambiante, como la conexión/desconexión de nodos mesh y de los enlaces inalámbricos entre ellos. En cuanto a los canales inalámbricos, utilizan un único SSID tanto para el tráfico de control como para el de datos, por lo que podemos clasificarlo como una estrategia de control in-band.

En [5] se define wmSDN una arquitectura con la que poder aplicar las ventajas de SDN en WMN. [6] introduce un controlador local en cada nodo, llamado EFTM, que actúa en situaciones de emergencia como es la partición de la red. No necesita tener toda la funcionalidad del controlador global, simplemente poder inyectar reglas OF en el nodo mesh para ofrecer un configuración inicial al nodo y seleccionar el controlador global más prioritario. En [6] se exponen más detalles sobre la implementación del OLSRd, del software OF y del EFTM.

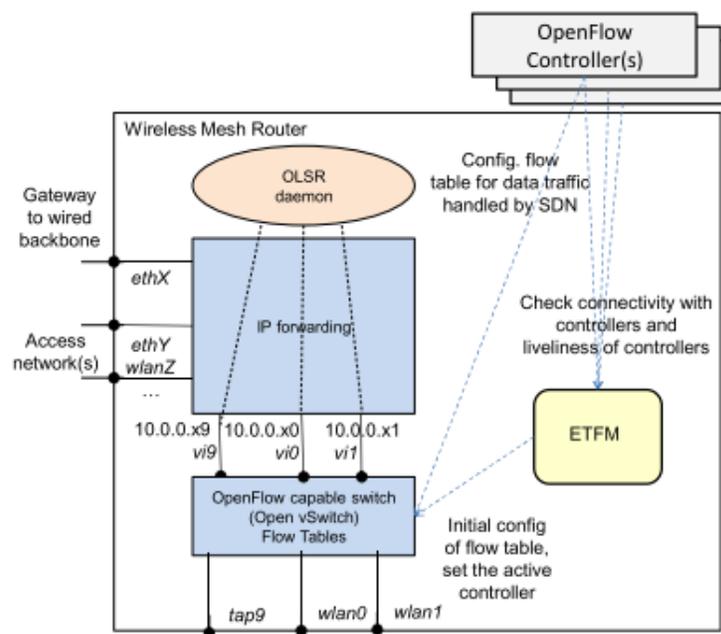


Figure 1: Arquitectura wmSDN

- **Nascimento et al. [7]** presentaron una manera de realizar el encaminamiento de los paquetes a través de la red mesh extendiendo la funcionalidad OF para hacerlo compatible con WMN. Recordamos que el protocolo OF estaba inicialmente diseñado para redes cableadas, por lo que la gestión de redes inalámbricas queda fuera de su marco funcional básico. Según esto, la extensión de OF incluye: (i) añadir nuevos mensajes para que el controlador SDN monitoree los parámetros inalámbricos, p. ej., el nivel de ruido, el modo y frecuencia de trabajo o la conexión con los nodos vecinos, (ii) introducir nuevas reglas que configuren las tablas de encaminamiento y (iii) añadir nuevas cabeceras IEEE 802.11 a los paquetes.

Los autores también propusieron dividir las dos interfaces físicas para obtener cuatro interfaces virtuales: una para reenviar el tráfico de control utilizando el protocolo Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) del estándar 802.11s, dos para conectarse a las redes de acceso (modo AP con un SSID asociado) y la cuarta destinada a la conexión con la red troncal (modo ad-hoc).

- Los autores **Schulz-Zander et al. [8]** presentan la arquitectura AeroFlux, que cuenta con una distribución del plano de control a dos niveles para (i) reducir la sobrecarga de comunicación entre el controlador y los nodos mesh y (ii) reducir la latencia en la configuración inalámbrica de los nodos mesh.

El primero nivel de control lo representa en un controlador global, encargado de tomar las funciones que requieren de una información global de la red, p. ej., la gestión de la movilidad de usuario, el balanceo de carga o la gestión de la topología de red. El segundo nivel de control lo compone varios controladores locales

cercanos a los AP, encargados de los eventos que aparecen con más frecuencia en la red, p. ej., control de la modulación y codificación, potencias de transmisión o gestión de frecuencias.

- **Mihalescu et al. [9]** presentan una arquitectura jerárquica donde el controlador local es responsable de determinar el estado de la configuración en base a la información local disponible. Cuando la conectividad con el controlador global se establece, se sincronizan los estados de configuración. Con la información recopilada de todos los controladores locales, el controlador global es capaz de determinar toda la topología de la red, incluso en entornos altamente dinámicos, y actualizar cada controlador local a los cambios y actualizaciones de políticas programadas por los administradores de red de manera centralizada.
- El enfoque de **Hurtado-Borras [10]** se apoya en la investigación [3], extendiendo la funcionalidad de OF para WMN. Se aborda la problemática del proceso de bootstrapping dado que, inicialmente, las tablas de encaminamiento de los nodos mesh están vacías y sólo se pueden rellenar tras establecer el canal de control con el controlador SDN. Para resolver este dilema, implementan un controlador local de SDN que rellena previamente las tablas de OF de acuerdo a ciertas reglas (aparece un psudocódigo).
- **Huang et al. [11]** proponen una arquitectura acorde a las WMN y con la funcionalidad de gestionar tráfico. El estudio se centró en el envío de tráfico de control y datos utilizando Software Defined Radio (SDR) y extendiendo la funcionalidad de OF. Con ello, minimizaron las interferencias y proporcionaron una mejor asignación de recursos.

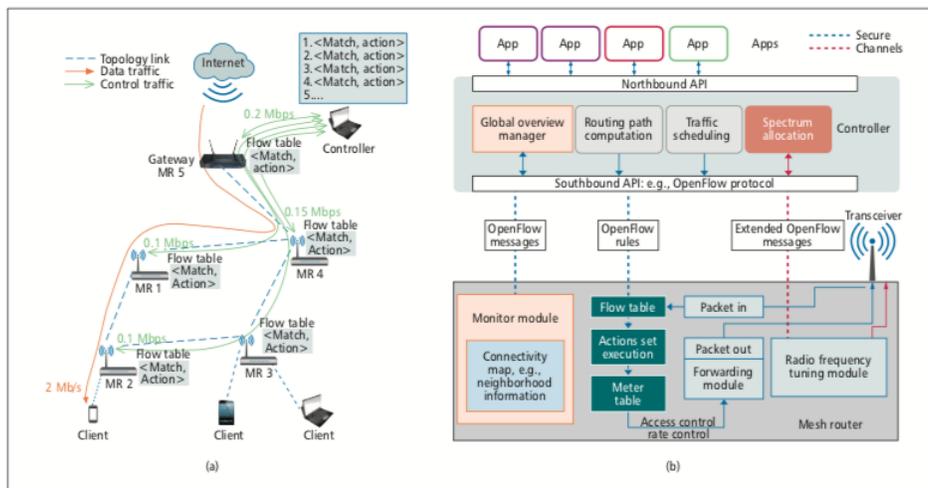


Figure 2: Arquitectura SD-WMN

La arquitectura SD-WMN cuenta con un controlador global compuesto de cuatro módulos: global overview manager, routing path computation, traffic scheduling y spectrum allocation. También cuenta con nodos mesh compatibles con OF, y equipados con los siguientes módulos:

- Monitor module, encargado de enviar la información de conectividad de vecinos al global overview manager en el controlador global.
- Flow tables para la instalación de reglas OF.
- OpenFlow meter tables para recopilar estadísticas de red y configurar la calidad de la configuración de los servicios.
- Forwarding modules para el envío de paquetes hacia las interfaces de red.
- SDR module para la sintonización de radiofrecuencia para el tráfico de control y datos
- **Yang et al. [12]** proponen una arquitectura pensada en un óptimo balanceo de carga en función de las máximas tasas de throughput posibles. Cada nodo mesh cuenta una interfaz inalámbrica dividida en dos virtuales: una controlada por OF para el tráfico de datos y otra para el de control gestionada por el protocolo BATMAN. A su vez, el protocolo de encaminamiento proporciona información de la topología de red y de la calidad de los enlaces. El controlador SDN solicita de manera periódica esa información a los agentes de monitorización localizados en cada uno de los nodos mesh para determinar las mejores rutas.
- **Niephaus et al. [13]** presentan la arquitectura Wireless Backhaul (WiBACK) basada en un diseño cross-layer operativo por debajo de la Capa de Red de la arquitectura OSI, es decir, no utiliza IP. La arquitectura consta

de un plano de control, inspirado en el estándar IEEE 802.21, y de un plano de datos basado en MPLS. Los nodos mesh ingress añaden una cabecera MPLS adicional a los paquetes de datos entrantes, basadas en las tablas de flujo, que se eliminan en los nodos egress. Por lo tanto, excepto para los dispositivos de entrada y salida, las tablas de flujo en cada dispositivo de red sólo necesitan contener reglas para conmutar correctamente los paquetes MPLS. Según esto, se establecen LSP asociadas a los requisitos de QoS solicitados y clases de tráfico.

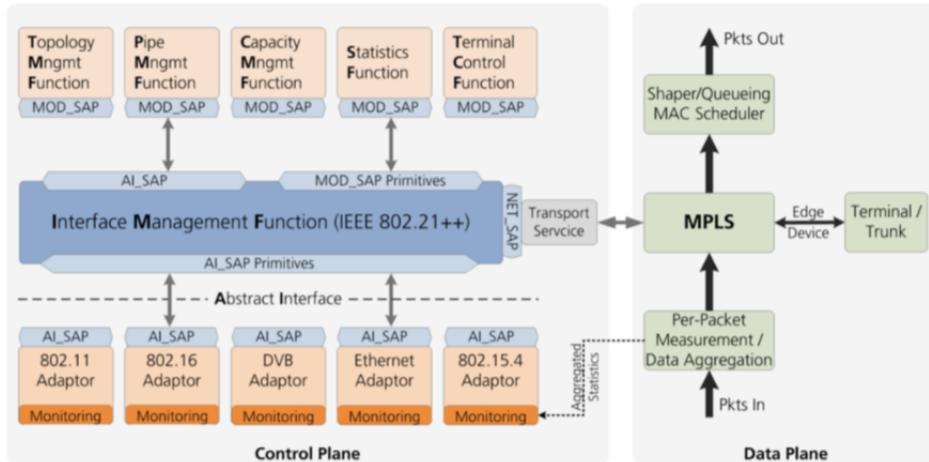


Figure 3: Arquitectura WiBACK

El componente principal del plano de control es Interface Management Function (IMF) que se sirve y amplía la funcionalidad de transferencia entre medios compartidos de IEEE 802.21. Su diseño proporciona una Abstract Interface (AI) que permita a los módulos de usuario IMF administrar la tecnología según el criterio de optimización global de la red. Además, introduce nuevas primitivas a las ya existentes en IEEE 802.21 para la gestión de redes inalámbricas heterogéneas. De entre todos los módulos de usuario IMF destacamos la funcionalidad de dos de ellos:

- Topology Management Function. Su objetivo principal es obtener una visión global de la topología (física y lógica) de la red, solicitando información a la AI a través de primitivas. Destaca su funcionalidad para identificar qué interfaces en qué dispositivo de red son físicamente capaces de comunicarse con qué otras interfaces de otro dispositivo, identificar qué interfaces son de la misma tecnología para sintonizar la misma frecuencia y están dentro del mismo rango de comunicación, analizar el espectro soportado por el hardware subyacente para asignar frecuencias y anchos de banda a las interfaces para minimizar las interferencias. Esta información, llamada topología física, se almacena en una base de datos. Tras ello, selecciona de entre las conexiones físicamente posibles los enlaces más óptimos y crea la topología lógica de la red utilizada para reenviar los datos.
- Capacity Management Function (CMF). Se encarga de asignar la capacidad disponible ante las peticiones de recursos por parte de los nodos mesh, sirviéndose de la topología lógica gestionada por el TMF.

En relación al proceso de bootstrapping, cada nodo mesh cuenta con un controlador WiBACK local (módulo de bootstrapping) para actualizar, al inicio, sus tablas de flujos y permitir la comunicación con otros nodos mesh hasta que se alcance la conexión con el controlador WiBACK global. Según esto, se inicia una fase de descubrimiento de vecinos enviando balizas por cada una de las interfaces para detectar posibles nodos vecinos y seleccionando el más adecuado de acuerdo a la intensidad de señal recibida (RSSI). Este proceso se basa únicamente en el conocimiento local del dispositivo por lo que, una vez establecida la conexión con el controlador WiBACK, el módulo de arranque se detiene y es el controlador global quien toman el relevo, pudiendo reevaluar la topología de la red y solicitando al nodo mesh que se conecte a la red a través de una conexión diferente, de acuerdo a una visión global.

- Santos y Kassler [14] presentan la arquitectura Software Defined Small Cell Radio Access Network (SOCRA). Su enfoque se centra en el diseño del controlador global (OF/SDN) capaz de controlar y solicitar información a los nodos mesh. Según esto, el controlador cuenta con la implementación de varios módulos:
 - Packet Handler para manejar los paquetes enviados al controlador (p. ej., para nuevos flujos de paquetes cuando no hay reglas instaladas en los nodos mesh). La información extraída se envía al Path Calculator.

- Path Calculator para calcular las rutas entre los nodos mesh e indicar la instalación de nuevas reglas de reenvío.
 - Neighborhood Mapper infiere una gráfica con la topología e interferencia para cada nodo/enlace.
 - Wireless Configuration Service envía mensajes de configuración inalámbrica a los nodos mesh a través de la extensión del protocolo OF.
 - Wireless Statistics Manager recopila la información de los parámetros de cada interfaz inalámbrica mediante el envío de solicitudes a cada uno de los nodos mesh.
 - Orchestrator Interface utiliza para la comunicación con el Orquestador de Red con el fin de realizar la reconfiguración de la red.
 - Metrics Collector responsable de obtener las métricas de rendimiento de la red que no pueden ser recuperadas directamente a través de OF (p. ej., retardo en los enlaces).
- **Patil et al. [15]** presentan un enfoque de ecaminamiento para SDWMN en tres etapas, modificando el protocolo OF: (1º) se asume que el controlador está conectado a unos pocos nodos mesh, y con la ayuda de OLSR otros nodos mesh pueden encontrar una ruta hasta el controlador global, (2º) el controlador global optimiza una ruta entre él y cada uno de los nodos mesh ya que tiene la visión global de la red y (3º) el controlador global envía mensajes OF para configura las tablas de encaminamiento de los nodos mesh de acuerdo a la ruta más corta. Además, se centran en el proceso de bootstrapping a través de la arquitectura propuesta.
 - Los autores **Tu et al. [16]** presentan la arquitectua Intelligent Software-Defined WiFi (ISD-WiFi) centrada en la movilidad de los usuarios y en la gestión de interferencia. Es reseñable la funcionalidad del elemento de red Intelligent Center cuando tenemos redes con multitud de controladores SDN, ya que facilita el intercambio de información entre ellos. Además en esta investigación se vuelve a extender la funcionalidad del protocolo OF para añadir los requisitos de las WMN.

3.1 Conclusiones

Como se puede apreciar, cada propuesta está focalizada en resolver determinados aspectos del conjunto total de SDWMN: la movilidad de los nodos/usuarios [3, 16], la gestión de interferencias [11, 16], la tolerancia a fallos [6], el routing y descubrimiento de la topología [3, 5, 6, 7, 13, 14, 15], el proceso de bootstrapping [10, 13, 15], la optimización de recursos y balanceo de carga [3, 11, 12, 10, 14, 13] o la asignación de prioridades y QoS a clases de tráfico [13]. Según esto, no existe una propuesta holística siendo [13] la más completa, aunque carece de las capacidades para mantener la red operando bajo saturación y de una optimización distribuida en tiempo real en la asignación de los recursos.

Dos líneas de investigación en el diseño de la arquitectura son claramente diferenciadas en relación a la configuración y gestión de las interfaces inalámbrica. Las dos opciones principales son colocar estas funcionalidades en un controlador inalámbrico separado (con o sin un protocolo de encaminamiento mesh) o incluirlas en el controlador SDN. En la primera, el comportamiento del controlador SDN se simplificaría pero requeriría la gestión de nuevos módulos en nuestra arquitectura. La adición de las funciones de configuración inalámbrica al controlador SDN implicaría aumentar la complejidad en el desarrollo, al modificar la implementación de OF para su compatibilidad con nuevas funciones.

Los términos de In-Band e Out-Band son dos estrategias de expresar el tipo de control de canal. Existe cierta controversia en la comunidad de investigación a la hora de clasificar una arquitectura como In-Band o Out-Band. Muchos autores consideran que la separación del canal de datos y de control ha de producirse a nivel físico (usando frecuencias distintas) y otros, en a un nivel más lógico (con interfaces virtuales y/o usando direcciones IP distintas para paquetes de control y datos). Una estrategia de control Out-Band a nivel lógico permite reduciría costes ya que no necesita de más tarjetas radio, simplifica la implementación del nodo mesh y proporciona ventajas en términos de seguridad ya que el tráfico de control no puede interferir con el tráfico de datos.

Finalmente, otro aspecto reseñable es la presencia o no de controladores locales en cada nodo mesh. La mayoría de las propuestas asumen que el controlador global SDN va a estar siempre disponible para rellenar las tablas de enrutamiento de los nodos. Sin embargo, en redes inalámbricos no es posible asumir eso, debido a la variabilidad de los enlaces. Según esto, se hace necesaria la presencia en los nodos mesh de un controlador local (SDN u otras estrategias (protocolos mesh, ficheros de configuración estáticos...)) capaz de aportar inteligencia al mismo.

References

- [1] A. Banchs , N. Bayer , D. Chieng , A. de la Oliva , B. Gloss and M. Kretschme , S. Murphyk , M. Natkaniec y F. Zdarsky. (2008). CARMEN: Delivering carrier grade services over wireless mesh networks, *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*.
- [2] C. Niephaus, O. G. Aliu, M. Kretschmer, S. Hadzic y G. Ghinea. (2015). Wireless Back-haul: a software defined network enabled wireless Back-haul network architecture for future 5G networks, *IET Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 287-295.
- [3] P. Dely, A. Kassler y N. Bayer. (2011). OpenFlow for Wireless Mesh Networks, *Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 1-6..
- [4] K. Ramachandran, E. Belding, K. Almeroth y M. Buddhikot. (2006). Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks, *Proc. IEEE INFOCOM*.
- [5] A. Detti, C. Pisa, S. Salsano y N. Blefari-Melazzi. (2013). Wireless Mesh Software Defined Networks (wmSDN), *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 89-95.
- [6] A. Detti, C. Pisa, S. Salsano, G. Siracusano, N. Blefari-Melazzi y P. Luigi Ventre (2014). Controller selection in a Wireless Mesh SDN under network partitioning and merging scenarios, *CoRR*.
- [7] V. Nascimento, M. Moraes, R. Gomes, B. Pinheiro, A. Abelem, B. Borges, K. Cardoso y E. Cerqueira (2014). Filling the gap between Software Defined Networking and Wireless Mesh Networks, *10th International Conference on Network and Service Management (CNSM) and Workshop*, pp. 451-454.
- [8] J. Schulz-Zander, N. Sarrar y S. Schmid. (2014). AeroFlux: A Near-Sighted Controller Architecture for Software-Defined Wireless Networks, *Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking*, pp. 217-218.
- [9] M. Mihailescu, H. Nguyen y M. Webb. (2015). Enhancing wireless communications with software defined networking, *Military Communications and Information Systems Conference*, pp. 217-218.
- [10] A. Hurtado-Borras, J. Pala-Sole, D. Camps-Mur y S. Sallent-Ribes. (2015). SDN wireless backhauling for Small Cells, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3897-3902.
- [11] H. Huang, P. Li, S. Guo y W. Zhuang. (2015). Software-defined wireless mesh networks: architecture and traffic orchestration, *IEEE Network*, pp. 24-30.
- [12] H. Yang, B. Chen y A. Kassler. (2015). A SDN controller architecture for Small Cell Wireless Backhaul using a LTE Control Channel, *WoWMoM 2016 - 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*.
- [13] C. Niephaus, O.G. Aliu, M. Kretschmer, S. Hadzic y G. Ghinea. (2015). Wireless Back-haul: a software defined network enabled wireless Back-haul network architecture for future 5G networks, *IET Networks*, vol.4, pp. 287-295.
- [14] R. Santos y A. Kassler. (2016). OpenFlow-based load balancing for wireless mesh network, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9483, pp. 368-379.
- [15] P. Patil (2016). Algorithms and techniques for transitioning to software defined networks, *Phd Thesis, Vanderbilt University*.
- [16] D. Tu, Z. Zhao y H. Zhang (2016). ISD-WiFi: An intelligent SDN based solution for enterprise WLANs, *2016 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*, pp. 1-6.
- [17] R. Santos y A. Kassler. (2018). 5G Backhauling with SDWN, *Phd Thesis, Karlstad University*.