



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Esquema de asignación de recursos en una red
inalámbrica definida por software (SDWN) para
garantizar QoS en la transmisión de vídeo**

Edison Fernando Aza Casanova

Universidad de Antioquia

**Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Electrónica y de Telecomunicaciones**

Medellín, Colombia

2020



Esquema de asignación de recursos en una red inalámbrica definida por software (SDWN)
para garantizar QoS en la transmisión de vídeo

Edison Fernando Aza Casanova

Trabajo de investigación como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Director:

Ph.D. Juan Pablo Urrea Duque

Co-Director:

Ph.D. Luis Alejandro Fletscher Bocanegra

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones

Medellín, Colombia

2020.

El escritor escribe su libro para explicarse a sí mismo lo que no se puede explicar.

Gabriel García Márquez.

El aprendizaje es un simple apéndice de nosotros mismos; dondequiera que estemos está también nuestro aprendizaje.

William Shakespeare.

Agradecimientos

En este proceso de construcción profesional, tuve el grato placer de conocer a personas que contribuyeron con su ayuda al avance y desarrollo de este proyecto y de mi formación, a quienes agradezco por las horas de su tiempo. Al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA), por el espacio y las herramientas. Pero aún más importantes, son las personas que me dieron la oportunidad de cursar, ejecutar y terminar un proceso como la maestría, al profesor Juan Pablo Urrea Duque por su constante e infaltable colaboración, al profesor Luis Alejandro Fletscher Bocanegra por confiar en mi talento y a mi familia por facilitarme el explorar nuevas etapas.

Resumen

Las redes inalámbricas institucionales (o de campus) ofrecen servicios de comunicación, que concentran la mayor parte del tráfico generado por los usuarios y sus aplicaciones. Dichas redes, se ocupan de la movilidad de un gran número de usuarios y problemas de infraestructura como la implementación de enrutadores no planificados. En este contexto, administrar la red se vuelve difícil, generando inconvenientes como la distribución del tráfico de manera desigual entre los diferentes puntos de acceso (AP) disponibles.

Este no es un problema menor, ya que balancear la carga de tráfico entre los AP, puede incrementar la calidad de servicio (QoS) percibida por los usuarios y mejorar el rendimiento de la red durante los períodos de congestión. Sin embargo, las soluciones disponibles no son un estándar y presentan una falta de interoperabilidad. Estos problemas, sumados a otros que presentan las redes actuales, motivaron la implementación de esquemas flexibles de equilibrio de carga, en una arquitectura de red escalable y centralizada como SDN (redes definidas por software).

Investigaciones recientes han mostrado que el balanceo de carga permite una mejor administración de los recursos, sin embargo, estos resultados en su gran mayoría se han quedado en entornos virtuales o emulados. Gracias a la tecnología ofrecida por OpenWrt y Open vSwitch, es posible realizar implementaciones de una red SDN sobre medios inalámbricos, usando dispositivos físicos.

En este proyecto, se plantean cuatro esquemas para balanceo de carga. Inicialmente se explora una de las técnicas más usadas, Round-Robin, ya que ofrece una lógica sencilla de distribución, en la cual toma el último cliente para liberar un AP saturado, y genera nuevas listas en los APs. La segunda técnica propuesta se basa en una lógica derivada del modelo de optimización, que transfiere el cliente con la carga más alta (Transfer Client with High Load), el cual puede causar una saturación en el sistema, y asignarlo a otro AP. La tercera implementación, se basa en el mejor ajuste (Best-Fit), donde se distribuye a todos los clientes entre los AP, dado el caso de que al menos uno supere el umbral de saturación. La última desarrolla la distribución de lógica completa del modelo de optimización (Optimization Model) basada en el problema de empaquetado (The Bin Packing Problem), donde se busca distribuir una cantidad de clientes en un número de APs disponibles.

A partir de este diseño conceptual, se realizaron experimentos para evaluar el rendimiento de cada uno de ellos en entornos con múltiples AP utilizando el controlador 5G-EmPOWER e incluyendo un proceso de traspaso transparente. Las implementaciones propuestas muestran mejoras en el rendimiento y relación de señal/ruido pico (PSNR) durante la transmisión de un vídeo, comparadas con los escenarios tradicionales.

Glosario

AP Punto de acceso, en inglés: Access point. 1, 2, 6, 10–12, 15–23, 25, 28, 29, 31–34, 37, 39–42, 46, 47, 49–52, 55, 63–68, 74

BF Mejor ajuste, en inglés: Best fit. 30, 35–38, 40, 49, 50, 52, 59, 67, 68, 71, 73, 74

BPP Problema de empaçado en contenedores, en inglés: Bin packing problem. 34–37, 39–41, 49, 50, 53, 68, 73

FF Primer ajuste, en inglés: First fit. 35, 36, 42

LVAP Punto de acceso virtual, en inglés: Light Virtual Access Point. 46, 47, 57, 74

MSE Error cuadrático medio, en inglés: Mean Square Error. 56, 58

OM Modelo de optimización, en inglés: Optimization model. 49, 50, 53, 59, 68, 71

POX es una plataforma de software de red escrita en python, en inglés: python NOX (python network operating system). 43, 44, 47, 48, 50, 55, 57, 58, 60–62, 74

PSNR Relación señal a ruido de pico, en inglés: Peak Signal to Noise Ratio. 2, 12, 55–57, 59, 70, 74

QoS calidad de servicio, en inglés: Quality of service. 1, 10–12, 14, 19, 21, 24, 31, 70

RR En inglés: Round-Robin. 30–33, 37, 40, 49–51, 59, 71, 73

SDN Redes definidas por software, en inglés: Software Defined Networking. 1, 6, 8, 11, 12, 14, 20, 23–28, 30, 43, 48, 49, 55, 67, 70, 73

SDWN Redes inalámbricas definidas por software, en inglés: Software Defined Wireless Networking. 11, 24

TCHL Transferencia del cliente con mayor carga, en inglés: Transfer client with high load. 30, 37, 39, 40, 49–51, 59, 66, 71, 73

WLAN Redes inalámbricas de área local, en inglés: Wireless Local Area Networks. 9, 11–13, 17, 25

WTP Puntos terminales inalámbricos o APs, en inglés: Wireless Termination Points. 46, 47

Índice general

1. Introducción	9
2. Métodos de balanceo de carga con QoS en redes inalámbricas IEEE802.11	13
2.1. Calidad de servicio en redes inalámbricas IEEE 802.11	14
2.1.1. Introducción a la calidad de servicio	14
2.1.2. Características QoS de la capa MAC para IEEE 802.11	14
2.1.3. Gestión de la movilidad en redes IEEE 802.11	15
2.1.4. Estándar IEEE 802.11: Escaneo pasivo, escaneo activo	15
2.2. Conceptos de balanceo de carga	16
2.2.1. Métricas de balanceo de carga	17
2.2.2. Técnicas de balanceo de carga	18
2.2.2.1. Distribución de carga basada en las estaciones inalámbricas (distribuida)	18
2.2.2.2. Distribución de carga basada en la red (centralizada)	18
2.2.3. Técnicas de asociación	19
2.2.3.1. Gestión de asociaciones	19
2.2.3.2. Control de admisión	19
2.2.3.3. Ajuste de cobertura	20
2.3. Redes definidas por software	23
2.3.1. SDN aplicado a redes WLAN	23
2.3.2. Implementación de QoS en SDWN en la tecnología IEEE 802.11	24
2.4. Tipos de balanceo de carga en SDN	24
3. Metodologías implementadas para el balanceo de carga en redes inalámbricas SDN	30
3.1. Balanceo de carga con Round-Robin	31
3.1.1. Método RR para un AP sin transferencia de clientes	31
3.1.2. Método RR para varios AP con transferencia de clientes	32

3.2. El problema de empaado en contenedores	34
3.2.1. Empacado de contenedores unidimensional	34
3.2.1.1. Descripción del problema y modelo	34
3.2.2. Heurísticas	35
3.3. Método BF con transferencia de clientes	36
3.4. Método TCHL con transferencia de clientes	38
3.5. Método OM con transferencia de clientes	39
3.5.1. Formulación MIP mas fuerte	41
3.5.1.1. Primer ajuste decreciente	42
4. Implementación de un prototipo de red WLAN-SDN	43
4.1. Prototipo de red inalámbrica WLAN con SDN	43
4.1.1. Tecnología utilizada	44
4.1.1.1. Controlador POX	44
4.1.1.2. Controlador 5G-EmPOWER	44
4.1.1.3. Gurobi	45
4.1.1.4. OpenWrt	45
4.1.1.5. iPerf	45
4.1.1.6. Open vSwitch	45
4.1.2. Arquitectura de red	46
4.1.3. Movilidad utilizando puntos de acceso virtuales	46
4.2. Configuración del prototipo de red	47
4.2.1. Prototipo de red utilizando el controlador POX	48
4.2.2. Prototipo de red utilizando el controlador 5G-EmPOWER	48
4.3. Factores	49
4.3.1. Algoritmos de balanceo de carga	50
4.3.2. Algoritmo RR para balanceo de carga con un AP	50
4.3.3. Algoritmo RR para balanceo de carga con varios AP	51
4.3.4. Algoritmo TCHL para balanceo de carga con varios AP	51
4.3.5. Algoritmo BF para balanceo de carga con varios AP	52
4.3.6. Algoritmo OM para balanceo de carga con varios AP	53
4.3.7. SDN	55
4.3.8. Vídeo	55
4.4. Métricas de desempeño	55
4.4.1. Rendimiento	55

4.4.2. PSNR	56
4.5. Recolección de datos	57
4.5.1. Algoritmo para la estimación de PSNR	57
5. Evaluación de desempeño de los esquemas de balanceo de carga en el prototipo WLAN-SDN	59
5.1. Evaluación del rendimiento en la transmisión de vídeo para los esquemas de balanceo de carga implementados	61
5.1.1. Round Robin para un AP en POX	61
5.1.2. Round Robin con transferencia de clientes en 5G-EmPOWER	62
5.1.3. Transferencia de cliente con mayor carga en 5G-EmPOWER (TCHL)	65
5.1.4. Mejor ajuste con transferencia de clientes en 5G-EmPOWER (BF)	66
5.1.5. Método de optimización en 5G-EmPOWER (OM)	68
5.2. Evaluación de la calidad de vídeo en la red utilizando los algoritmos de balanceo de carga implementados	70
6. Conclusiones	73
Bibliografía	75

Índice de figuras

1.1. Tráfico IP Global. Evolución esperada del tráfico IP 2017–2022 (Exabytes/Mes) [5].	10
2.1. Canales IEEE 802.11 [25].	16
2.2. Comparación de una red tradicional y una arquitectura de red SDN [21].	23
2.3. Wi-Balance demostración del sistema desplegado [40].	26
3.1. Diagrama de flujo RR para un AP	32
3.2. Diagrama de flujo RR con varios AP y proceso de transferencia.	33
3.3. Diagrama de flujo BF con varios AP y proceso de transferencia.	37
3.4. Diagrama de flujo TCHL con varios AP y proceso de transferencia.	38
3.5. Diagrama de flujo OM (decisión) con varios AP y proceso de transferencia.	39
3.6. Diagrama de flujo OM (distribución) con varios AP y proceso de transferencia.	40
4.1. Unidad experimental.	43
4.2. Tecnología utilizada (software y hardware).	44
4.3. Arquitectura de 5G-EmPOWER [55].	46
4.4. Prototipo de red con POX.	48
4.5. Prototipo de red con 5G-EmPOWER.	49
5.1. Resultados RR con 3, 4 y 5 clientes.	61
5.2. Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.	62
5.3. Resultados RR con 3, 4 y 5 clientes.	63
5.4. Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.	63
5.5. Resultados TCHL con 3, 4 y 5 clientes.	65
5.6. Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.	65
5.7. Resultados BF con 3, 4 y 5 clientes.	67
5.8. Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.	67
5.9. Resultados OM con 3, 4 y 5 clientes.	69

5.10. Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.	69
5.11. Resultados del PSNR promedio.	71

Índice de tablas

2.1. Niveles de prioridad de colas en IEEE 802.11 para varios tipos de aplicaciones [21].	15
2.2. Comparación de las técnicas de asociación [30].	21
2.3. Implementaciones de balanceo de carga en redes WLAN sin SDN.	21
2.4. Algoritmos de balanceo de carga con SDN.	26
3.1. Explicación de BPP, donde cada elemento son números reales positivos [44]. . .	34
5.1. Detalles de vídeo.	59
5.2. Configuración experimental.	59
5.3. Software.	60
5.4. Hardware.	60
5.5. Detalle de experimentos.	60
5.6. Rendimiento promedio comparando RR-POX con la red tradicional.	62
5.7. Rendimiento promedio comparando RR - 5G-EmPOWER con la red tradicional.	64
5.8. Rendimiento promedio comparando TCHL - 5G-EmPOWER con la red tradicional.	66
5.9. Rendimiento promedio comparando BF - 5G-EmPOWER con la red tradicional.	68
5.10. Rendimiento promedio comparando OM - 5G-EmPOWER con la red tradicional.	70
5.11. PSNR promedio (dB).	71
5.12. Porcentaje de aproximación.	71

1

Introducción

Las telecomunicaciones son un factor importante y crítico en el actual crecimiento de la sociedad, y en particular, las redes inalámbricas son parte del avance tecnológico en las ciudades. En las redes institucionales, los usuarios disfrutan de servicios de Internet como vídeo en línea, compartir archivos, navegar en la web, servicios de voz, etc. En este tipo de redes, una de las estrategias de conectividad para facilitar el acceso, se fundamenta en la integración de varias redes inalámbricas de área local (WLAN) [1] [2] [3] [4]. La infraestructura inalámbrica de la red concentra la mayor parte del tráfico generado y requerido por los usuarios, considerando factores como la movilidad de los usuarios, la cantidad de usuarios, y el consumo de tráfico de las aplicaciones.

En este sentido, el tráfico que presentan los dispositivos móviles y las redes WiFi excederá el tráfico de las redes cableadas para el año 2022, representando el 29 % del tráfico IP total. Así mismo, el tráfico IP en WiFi y dispositivos móviles (dispositivos de redes inalámbricas) representará el 71 % del total, como podemos ver en la Figura 1.1 [5] [6] [7].

De acuerdo con estos datos, el tráfico generado y requerido por los usuarios va en aumento, por lo que es necesario explorar mecanismos para distribuir las cargas y mitigar las fallas asociadas al incremento de la demanda de ancho de banda en las redes inalámbricas, considerando que se requiere un mayor control de este tráfico en comparación con las redes cableadas, dada la naturaleza poco confiable del medio inalámbrico.

En términos generales, existen dos métodos de balanceo de carga, que son los administrados por el dispositivo o los administrados por la red. Los métodos administrados por el dispositivo carecen de una visión global de la red para la toma de decisiones, mientras que los métodos

administrados por la red, son métodos distribuidos que requieren un excesivo intercambio de mensajes entre los APs.

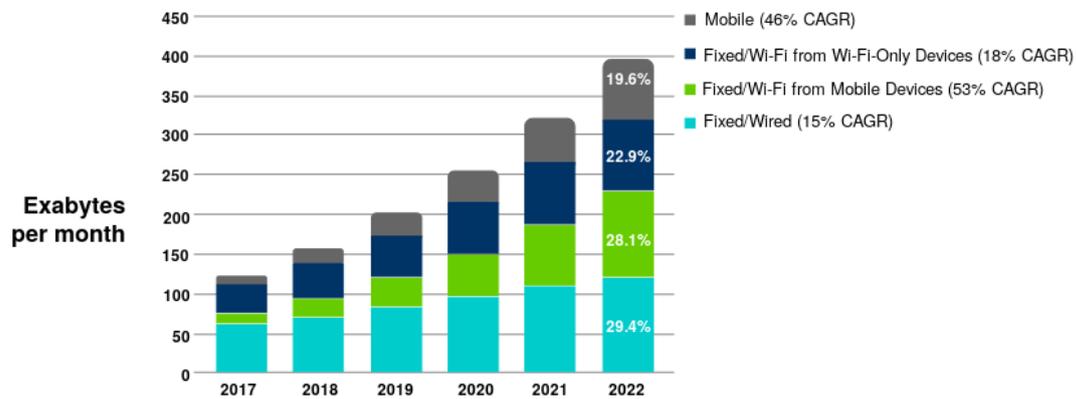


Figura 1.1: Tráfico IP Global. Evolución esperada del tráfico IP 2017–2022 (Exabytes/Mes) [5].

La transmisión de vídeo en tiempo real es un factor de importancia en las redes inalámbricas y actualmente es uno de los servicios más utilizados por los usuarios en sus dispositivos móviles. Sin embargo, el vídeo en algunas ocasiones sufre de pixelación, pérdida de sonido y de imagen, pausas esporádicas y reproducción lenta. Para garantizar calidad de servicio (QoS, siglas en inglés) y calidad de la experiencia (QoE, siglas en inglés), la transmisión de vídeo depende en gran medida de la capa de acceso al medio, siendo el estándar IEEE 802.11 el de mayor uso por los dispositivos para este proceso [8].

En este contexto, algunos esquemas de asignación de recursos plantean un mejor uso del medio inalámbrico para satisfacer la demanda de los dispositivos. Para ello, analizan dinámicamente la demanda en relación con la hora del día y la ubicación del usuario, a la vez que consideran aspectos como la disponibilidad y capacidad de la red, al igual que la infraestructura desplegada [9] [10]. En este sentido, el estándar IEEE 802.11e permite que el tráfico con requisitos de QoS pase menos tiempo compitiendo por acceder al medio inalámbrico [11]. Sin embargo, bajo condiciones de carga pesada en un punto de acceso (AP), se pueden experimentar grandes retrasos o pérdidas.

Adicionalmente, de forma general, es importante considerar que los dispositivos se asocian con el AP que tiene el indicador de intensidad de señal recibido más fuerte (RSSI), ignorando las condiciones de carga de su receptor [12] [13]. Debido a esto, algunos proveedores han introducido soluciones propietarias que implementan un balanceo de carga entre los APs de la red, pero existen dos inconvenientes: la falta de interoperabilidad y la no cooperación.

Además, la dependencia de métodos no estandarizados hace que las redes WLAN sean complejas de interoperar entre APs de diferentes fabricantes. En estos casos es necesario una arquitectura de red escalable y centralizada que permita administrar múltiples tecnologías con diferentes protocolos en un mismo entorno [14] [15] [16] [17]. Por lo tanto, proponer métodos no propietarios para equilibrar la carga en la red entre varios AP, reducirá los retrasos y las colisiones, mejorando a su vez la QoS percibida por los usuarios, lo que al final desencadenará en una herramienta para incrementar el rendimiento de la red durante los períodos de congestión [18].

Los problemas mencionados anteriormente, son parte de la motivación para enfocar este proyecto en la implementación de protocolos de equilibrio de carga para redes IEEE 802.11, de tal forma que se logre un proceso de asociación consciente de la carga entre los usuarios con los APs, evitando posibles APs congestionados y aumentando el rendimiento general del sistema.

En este contexto, las redes definidas por software (SDN, siglas en inglés), presentan innovaciones en la arquitectura de red que pueden mejorar el desempeño en las redes inalámbricas. SDN separa el plano de control del plano de datos, simplificando el control de la red y permitiendo una evolución hacia la abstracción de las funciones de red a un plano de control lógico centralizado [19]. Así mismo, SDN permite enfocar la atención de la red inalámbrica en el controlador principal, teniendo en cuenta el tráfico que se genera para los dispositivos conectados. En este sentido, la gestión de una red inalámbrica mediante SDN, permitiría distribuir las cargas entre los APs, generando un sistema equilibrado con el fin de mejorar la calidad de servicio (QoS) que las aplicaciones y usuarios requieren en sus transmisiones.

De esta forma, el desarrollo del proyecto responde a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo SDN puede mejorar la transmisión de vídeo con métricas de QoS en una red inalámbrica, gestionando la distribución de las cargas en la red?

Objetivo general Implementar un algoritmo de balanceo de carga en una red inalámbrica definida por software (SDWN) para garantizar QoS en la transmisión de vídeo

Objetivos específicos

- Seleccionar la técnica de balanceo de carga que permita integrar SDN en redes WiFi
- Implementar la técnica de asignación de recursos seleccionada en un prototipo de red inalámbrica.

- Revisar el desempeño de la técnica seleccionada, con las métricas de calidad de servicio en la transmisión de vídeo
- Comparar los resultados obtenidos por la implementación realizada utilizando SDN en contraste con la implementación de una red WLAN sin SDN.

Considerando lo anterior, en este trabajo se implementaron cuatro mecanismos para balanceo de carga, bajo el enfoque de la asignación de recursos y utilizando SDN sobre redes inalámbricas para asegurar QoS en transmisión de vídeo. Además, se evaluó el desempeño de las técnicas implementadas en un entorno real, considerando para ello el rendimiento de los AP y comparando la calidad del vídeo original con el recibido por los clientes gestionados bajo el enfoque SDN. Dicha comparación se realizó utilizando métricas de calidad de vídeo como la relación señal a ruido pico (PSNR).

2

Métodos de balanceo de carga con QoS en redes inalámbricas IEEE802.11

Las redes de área inalámbricas (WLAN) son el método preferido para interconectar dispositivos móviles a las redes de comunicación, gracias a la disponibilidad de interfaces de red de bajo costo. En consecuencia, esto ha hecho que el servicio WLAN sea esencialmente un servicio básico, especialmente en áreas públicas como parques, centros comerciales, empresas y universidades. Pero el aumento de estas redes presenta inconvenientes debido al crecimiento del número de usuarios, el despliegue de redes sin estudio previo, y la falta de interoperabilidad entre fabricantes de APs. Por lo tanto, es necesario identificar métodos para mejorar el rendimiento de las redes WLAN [20].

El proceso de evolución de las redes, ha permitido el desarrollo de nuevas formas de solución a los problemas que aparecen a medida que la demanda por los recursos aumenta. Desde las redes inalámbricas tradicionales, definidas por el estándar IEEE 802.11, se evalúan características de calidad de servicio y esquemas de balanceo de carga que permiten una mejor distribución del tráfico. Para ello, se tienen en cuenta técnicas, centralizadas o distribuidas, esquemas de asociación y el tipo de escaneo realizado en el medio. Por tanto, la gestión de la movilidad es un aspecto fundamental para mantener la conectividad con la mínima interrupción posible.

Así mismo, las redes definidas por software hacen uso de estos métodos y técnicas existentes, aplicándolas a las redes inalámbricas para dar soporte y eficiencia bajo un esquema de control centralizado. En el marco de las redes inalámbricas definidas por software, la

calidad de servicio y el balanceo de carga juegan un papel importante. Particularmente, los esquemas de balanceo de carga hacen uso de algoritmos estáticos y dinámicos como los utilizados en las redes tradicionales. Estos tipos de balanceo de carga en SDN, presentan otras alternativas como el manejo de prioridad, predictivas, y basadas en tiempos de respuesta. En general, el balanceo de carga con SDN permite la implementación de diversas formulaciones matemáticas, incluso técnicas de optimización.

2.1. Calidad de servicio en redes inalámbricas IEEE 802.11

2.1.1. Introducción a la calidad de servicio

QoS se define como un conjunto de métricas que establecen un rango de operación adecuado para el correcto funcionamiento de un sistema bajo los requerimientos de los usuarios. QoS incluye un conjunto de parámetros para controlar las funcionalidades de acuerdo con las necesidades de los usuarios y el desempeño del sistema [21] [22].

Actualmente, el estándar IEEE 802.11e [8] provee mecanismos para soportar QoS a nivel de la capa MAC (control de acceso al medio), incorporando prioridad de tráfico y políticas de encolamiento con el fin de prestar servicios diferenciados entre los flujos de la red [21].

2.1.2. Características QoS de la capa MAC para IEEE 802.11

Este estándar define una función de distribución coordinada (DCF) para reducir las colisiones generadas por transmisiones simultáneas de múltiples fuentes en un canal compartido. De manera general, las principales técnicas usadas para garantizar QoS en la capa MAC incluyen control de admisión y planificación. En el estándar IEEE 802.11, la capa MAC proporciona funcionalidades de: direccionamiento, entramado, confiabilidad y coordinación de acceso al medio inalámbrico [21].

Las mejoras de QoS que presenta la capa MAC se encargan de reducir la sobrecarga, diferenciando las tramas en base a la prioridad y manteniendo las colisiones al menor nivel posible. Se han propuesto varias técnicas de mejora de QoS para la norma IEEE 802.11, como son: colas con prioridad (priority queueing), servicios diferenciados (differentiated services), planificación de QoS (QoS Scheduling) y control de tráfico (traffic shaping). El método de

“colas con prioridad” se usa para proveer prioridad de colas en la capa MAC y da a conocer ocho niveles de prioridad diferentes, como se ve en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Niveles de prioridad de colas en IEEE 802.11 para varios tipos de aplicaciones [21].

Prioridad	802.1D Prioridad de usuario	802.11 e Categoría de acceso (AC)	Descripción
Más bajo	1	AC_BK	Trafico general
	2	AC_BK	Trafico general
	0	AC_BE	Mejor esfuerzo
	3	AC_BE	Mejor esfuerzo
	4	AC_VI	Vídeo
	5	AC_VI	Vídeo
Más alto	6	AC_VO	Voz
	7	AC_VO	Voz, Administración de red

2.1.3. Gestión de la movilidad en redes IEEE 802.11

La gestión de la movilidad permite garantizar que un usuario conectado a una red inalámbrica, pueda moverse libremente dentro de ella, sin que su conexión a la red se vea afectada [23]. En este proceso se gestiona traspaso (handoff/handover) que permite mantener la conexión del usuario mientras este se mueve en la red de un punto de conexión a otro [24].

Cuando un cliente se está moviendo, la intensidad de la señal RSSI (Received Intensity Signal Indicator) proveniente de un AP se puede degradar a tal punto que el cliente pierde conectividad, forzando el inicio del proceso de handoff. Cuando el cliente no está conectado a la red, y necesita encontrar APs potenciales para conectarse, realiza la fase de descubrimiento (o escaneo) donde escucha tramas enviadas periódicamente por los APs disponibles en sus respectivos canales de operación. Una vez el cliente ha encontrado el AP que ofrece la mejor intensidad de señal, inicia la fase de asociación y autenticación.

2.1.4. Estándar IEEE 802.11: Escaneo pasivo, escaneo activo

El estándar IEEE 802.11 [8], define dos métodos para escanear: activo o pasivo. En el escaneo activo, el cliente envía tramas de prueba (probe request), a cada canal con el objetivo de encontrar APs disponibles. Los APs disponibles responden con tramas de respuesta (probe response), en su respectivo canal de operación [25] [10]. En el escaneo pasivo, el cliente sólo

escucha tramas beacon sin enviar ninguna trama de prueba (probe request) [25] [10]. Debido a esto, la latencia en la fase de descubrimiento depende del número de tramas de prueba enviadas, el tiempo de espera en cada canal por respuesta, y el tiempo de conmutación entre canales. El estándar IEEE 802.11 [8] define una arquitectura multicanal que permite el uso de 14 canales (Figura 2.1), de los cuales, son perfectamente ortogonales (canal 1, canal 6 y canal 11) [25].

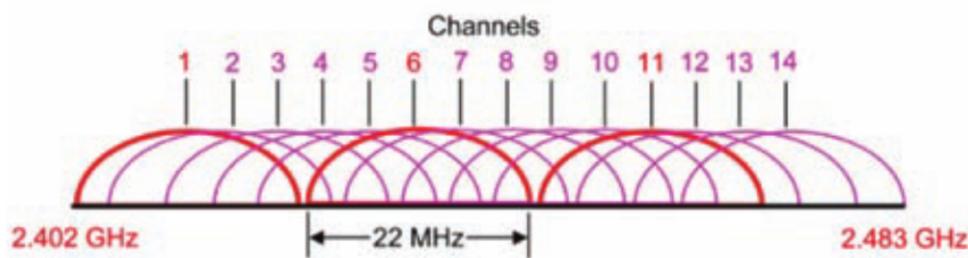


Figura 2.1: Canales IEEE 802.11 [25].

El rendimiento de la red depende en gran medida de la administración de los canales inalámbricos y la forma en que se resuelve si los clientes usan un canal específico [25]. De esta manera, antes de que un cliente pueda recibir el servicio de reenvío de tramas por parte de un AP, debe estar asociado con dicho AP [10].

Para descubrir los puntos de acceso disponibles, los clientes realizan exploraciones, y luego establecen su conexión con una fase de asociación y una de autenticación de acuerdo con el estándar IEEE 802.11 [25] [10]. Una vez el cliente ha encontrado el AP que ofrece la mejor intensidad de señal, inicia la fase de asociación. En esta el cliente envía una trama de asociación (association request) al AP seleccionado, para luego responder con una trama (association response) e indicar que se encuentra disponible [25] [24]. La fase de autenticación inicia una vez el proceso de asociación ha finalizado. Esta fase puede implicar que el AP inicial transfiera la información de autenticación al AP final [25] [24].

2.2. Conceptos de balanceo de carga

La idea principal de un balanceo, es igualar las cargas en los APs disponibles, mediante la transferencia de esta, a APs inactivos [9]. El balanceo de carga inicia cuando diferentes puntos de acceso (APs) que cubren un área en común o un área superpuesta, en la que los clientes pueden elegir conectarse, al menos, a dos APs, resuelven sus conexiones. El balanceo de

carga es una técnica que permite distribuir equitativamente la carga de la red entre todos los puntos de acceso disponibles, con base en políticas predefinidas [25] [9] [20].

Los algoritmos de balanceo de carga pueden clasificarse en tres categorías: algoritmos estáticos, algoritmos dinámicos y algoritmos adaptativos. En los algoritmos estáticos, las decisiones de balanceo de carga están programadas en el algoritmo utilizando un conocimiento a priori del sistema [9]. Los algoritmos dinámicos utilizan la información de estado del sistema para tomar las decisiones de balanceo de carga. Los algoritmos dinámicos tienen el potencial de superar a los algoritmos estáticos, ya que pueden explotar las fluctuaciones a corto plazo en el sistema para mejorar el rendimiento [9] [26] [27] [28]. Los algoritmos adaptativos son una clase especial de algoritmos dinámicos que adaptan sus actividades cambiando dinámicamente los parámetros para acoplarse al estado cambiante del sistema [9].

2.2.1. Métricas de balanceo de carga

La efectividad de cualquier balanceo de carga solo se puede juzgar en función de sus resultados para mejorar el rendimiento de la red [20]. Pero, efectuar un conteo de clientes sólo estima aproximadamente la carga de trabajo de un AP, ya que las condiciones del tráfico varían significativamente entre clientes y cambian con el tiempo [10]. Determinar una WLAN equilibrada utilizando una métrica cuantitativa resulta simple. Sin embargo, una métrica cualitativa es más complicada, ya que los resultados solo dan una impresión de las cargas de trabajo en APs individuales [20].

Dos formas de evaluar la equidad son el índice de equidad de Jain y el índice de equidad máximo-mínimo con sus respectivas variantes [20]. El tipo de métrica seleccionada puede afectar el tipo de balanceo de carga implementado en el sistema, influyendo en los métodos que determinan cómo se equilibra la carga [20]. En ciertos casos, una medida de equidad no siempre se utiliza para indicar una red equilibrada. Este suele ser el caso en los sistemas de equilibrio de carga en los que la operación se dispara cuando se produce un incumplimiento en un umbral predeterminado. Sistemas como estos son más simples de implementar y no se centra realmente en un equilibrio de cargas de trabajo entre AP sino solo en corregir una falla en la red para mejorar la calidad general del servicio en la red [20].

2.2.2. Técnicas de balanceo de carga

Las técnicas de balanceo de carga se pueden clasificar en dos categorías: centralizadas y distribuidas. Los enfoques centralizados implementan políticas en un único dispositivo de red. Por el contrario, en los enfoques distribuidos, las políticas se realizan en todos los APs de la red. Los enfoques centralizados aseguran la interoperabilidad de los dispositivos, pero a diferencia de los enfoques distribuidos, no son tolerantes a fallas [12] [25] [29]. Los mecanismos de balanceo de carga se caracterizan por tres procesos básicos [25]:

- Selección del cliente a mover de un AP a otro.
- Selección del nuevo AP con mejor rendimiento al cual enviar el cliente.
- Cliente asociado al nuevo AP.

2.2.2.1. Distribución de carga basada en las estaciones inalámbricas (distribuida)

En este enfoque, los clientes seleccionan un AP que maximice sus beneficios potenciales (como el ancho de banda). La búsqueda de un AP que proporcione el máximo ancho de banda disponible, implementa implícitamente la selección del AP de menor carga primero, una heurística de equilibrio de carga ampliamente utilizada [25][30]. Así mismo, los clientes pueden adquirir las condiciones de carga de un AP y determinar según los elementos adquiridos a qué AP asociarse, siempre que presente el mejor rendimiento [10].

También los clientes pueden administrar estática o dinámicamente la asociación con un AP. En el caso estático, un cliente realiza la selección de un AP antes de asociarse con el AP objetivo y no se relaciona con otros AP mientras la asociación se mantenga [10]. El inconveniente de la selección estática de AP, es que no puede adaptarse a los cambios de la red. En contraste, con la selección dinámica, un cliente puede volver a asociarse con otro AP incluso si la asociación actual aún se mantiene. Este enfoque se adapta mejor a entornos de red altamente dinámicos [30] [10].

2.2.2.2. Distribución de carga basada en la red (centralizada)

En este enfoque, una entidad del lado de la red (un servidor), controla la distribución de carga del AP. Los AP desempeñan un papel activo en la gestión de la solicitud del cliente. Los

clientes se comportan pasivamente al modificar sus asociaciones con el AP [30] [10].

Una selección de AP y cliente candidato se puede realizar de forma aleatoria. Pero, este enfoque no es óptimo porque puede causar la elección de un cliente que no genera altos flujos de tráfico cuando la sobrecarga podría ser determinada por el cliente no seleccionado [25]. Por el contrario, la mejor técnica consiste en elegir el cliente apropiado, en función de métricas específicas como el tráfico generado o el porcentaje de pérdida de paquetes [25] [9]. La selección del AP, puede realizarse utilizando dos mecanismos diferentes: el enfoque basado en el umbral y la técnica del umbral relativo. En el primero, un AP acepta una solicitud de asociación si una métrica de carga establecida no excede un valor límite (threshold) [25] [10]. En el segundo, se selecciona el mejor AP considerando las métricas de carga de todos los AP disponibles, sin considerar el rendimiento real de la red para cumplir con los requisitos de calidad de servicio (QoS) [21]. Finalmente, la asociación de un cliente a un punto de acceso puede regularse utilizando los siguientes enfoques [25]:

- Gestión de asociaciones (Association management).
- Control de admisión (Admission control).
- Ajuste de cobertura (Coverage adjustment).

2.2.3. Técnicas de asociación

2.2.3.1. Gestión de asociaciones

La técnica de gestión de asociación se basa en la posibilidad de que un AP pueda enviar una trama de asociación a un cliente [25]. Por lo tanto, este esquema de gestión de asociación requiere de la continua supervisión y balanceo de la red, ya que implica mover un cliente ya asociado a otro AP y así redistribuir la carga [25] [20] [30] [10].

2.2.3.2. Control de admisión

El mecanismo de control de admisión permite a un AP rechazar la asociación de un nuevo cliente en caso de riesgo de sobrecarga, teniendo en cuenta requisitos de QoS [25]. Los AP no sobrecargados aceptan solicitudes de asociación en función de su propio estado de carga, es decir, aceptan solicitudes si el nivel de carga previsto después de la asociación no supera

algún umbral (threshold) [30] [10]. Los nuevos clientes hacen que el balanceador de carga evalúe las condiciones actuales en todos los AP para permitir nuevas asociaciones [20].

2.2.3.3. Ajuste de cobertura

De forma general, cada usuario escanea los canales disponibles para detectar sus AP cercanos y asociarse con el AP que tiene el indicador de intensidad de señal recibido más fuerte (RSSI), ignorando su condición de carga. Para este problema en [12], proponen dos enfoques para resolver el equilibrio de carga: la imparcialidad máxima-mínima y el equilibrio de carga mínimo-máximo. El primero, proporciona en un sistema un servicio justo si todos los usuarios tienen el mismo ancho de banda asignado, donde no existe forma de modificar sin afectar al resto. En el segundo, proponen extender las técnicas de balanceo de carga existentes para equilibrar las cargas AP y obtener un servicio justo.

Una mejora de la técnica por intensidad de señal es Cell breathing [11], donde el ajuste de cobertura proporciona políticas específicas basadas en la reducción de la potencia de transmisión para evitar solicitudes de asociación [25] [10]. Los AP sobrecargados y subcargados reducen y aumentan la potencia de transmisión respectivamente, logrando así la distribución adecuada de los clientes en la red [15] [10] [31]. Las ventajas y desventajas de las técnicas de asociación, además de quien determina el control que estas establecen se describen en la Tabla 2.2, resaltando los puntos de comparación entre ellas. En la Tabla 2.3 se encuentra un resumen de diferentes esquemas de balanceo de carga.

Llevar el ámbito de las redes tradicionales a algo mucho más versátil, ha generado nuevos estándares para administrar la red en el medio inalámbrico. La tendencia en las redes actuales es el uso de SDN para reemplazar la arquitectura estática de las redes tradicionales [20]. La mayoría de las implementaciones actuales de SDN en redes inalámbricas giran en torno a la unificación y estandarización de interfaces de control entre las secciones cableadas e inalámbricas. A medida que se presenten mejoras, SDN podrá estandarizar los métodos de control de modo que el tráfico basado se pueda interpretar como un flujo [20] [21].

Tabla 2.2: Comparación de las técnicas de asociación [30].

	AP controla el rango de transmisión	El cliente determina la asociación	Ventajas	Desventajas
Gestión de asociaciones	No	No	<ul style="list-style-type: none"> * Ajusta dinámicamente la carga para mantener un mayor equilibrio. * Se puede seleccionar cualquier nodo para ajustar. 	<ul style="list-style-type: none"> * Efecto ping-pong. * Alta sobrecarga causada por el ajuste de frecuencia.
Control de admisión	No	No	<ul style="list-style-type: none"> * Evita la carga en exceso y mantiene un alto rendimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ajuste de carga solo a través del ingreso de nueva carga. * La carga se desequilibra una vez que un cliente se va.
Ajuste de cobertura	Si	Si	<ul style="list-style-type: none"> * Menor sobrecarga ajustando la carga desde el nodo de borde. * Reduce el tamaño de la celda modulando el alto ancho de banda. 	<ul style="list-style-type: none"> * Problema de hendidura. * Menos flexible al ajustar los clientes, que se encuentran en el área central de un AP.

Tabla 2.3: Implementaciones de balanceo de carga en redes WLAN sin SDN.

Artículo	Método	Ventajas	Desventajas
Load Balancing in IEEE 802.11 Networks [10] (2009)	Control de admisión	<ul style="list-style-type: none"> * Aun con gran cantidad de clientes presenta estabilidad entre los APs. * Presenta bajas tasas de pérdida de paquetes incluso si el AP está congestionado (alto rendimiento). 	<ul style="list-style-type: none"> * El mayor rendimiento del sistema no necesariamente produjo tasas bajas de pérdida de paquetes. * No puede garantizar un alto rendimiento, debido al bajo control de pérdida de paquetes.
Load Balancing for QoS Enhancement in IEEE802.11e WLANs Using Cell Breathing Techniques [11] (2005)	modelo path-loss	<ul style="list-style-type: none"> * Reducir el número de usuarios activos en el área BSS reduce las colisiones que se presentan en el medio inalámbrico. 	<ul style="list-style-type: none"> * Puede no garantizar el adecuado rendimiento si los clientes cambian.

	Control de asociación	<ul style="list-style-type: none"> * El tráfico de mayor prioridad tiene una mejor oportunidad de acceder al canal más rápidamente. * Mantiene o mejora el nivel actual de servicio que se proporciona a los usuarios. 	<ul style="list-style-type: none"> * Puede provocar un retardo de acceso si la prioridad no se asigna adecuadamente. * Tiene efecto en la tasa general de pérdida de frame.
Wireless LAN load balancing With genetic algorithms [13] (2009)	<p>Método cruzado, usando como métricas:</p> <p>Throughput Bandwidth</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Se garantiza la equidad para todos los clientes, un micro GA aumenta el ancho de banda que se recibe. * Aumenta cuan mayor ancho de banda presenta y menos clientes garantizan más rendimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> * Los GA al tener mayor rendimiento no garantizan mayor ancho de banda, en ocasiones.
Load balancing in overlapping wireless LAN cells [18] (2004)	<p>Control de asociación y transmisión, usa las métricas:</p> <p>Throughput Packet delay</p>	<ul style="list-style-type: none"> * A mayor rendimiento menos pérdida de paquetes. * Mejora sus prestaciones al enviar clientes a puntos de acceso no sobrecargados. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se produce pérdida de paquetes al no realizar una transferencia adecuada.
Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control [12] (2007)	Control de asociación	<ul style="list-style-type: none"> * Administra las conexiones permitiendo establecer un mejor rendimiento. * Asegura la asignación de ancho de banda equitativo máximo-mínimo * Facilita la selección y conexión por parte de los clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> * No proporciona equidad a corto plazo, generando sobrecarga de comunicación e interrumpiendo sesiones en curso. * Requiere cambios en las estaciones en el proceso de selección de los AP para la asociación. * Requiere cambios en AP para recopilar y difundir información de red a otras estaciones. * Puede causar migraciones masivas porque los AP de asociación no manejan las transferencias.
		<ul style="list-style-type: none"> * Determina las asociaciones realizadas, apoyándose en el algoritmo Kuhn-Munkres (K-M). 	<ul style="list-style-type: none"> * El resultado no es necesariamente el óptimo, ya que se desconoce el estado del AP destino.

A Semi-Matching Based Load Balancing Scheme for Dense IEEE 802.11 WLANs [31] (2017)

Relación de tiempo ocupado del canal (CBTR). * Ampliamente utilizada por los clientes para seleccionar AP de destino, considerando al mejor candidato.

2.3. Redes definidas por software

Las redes definidas por software (SDN) son todas aquellas que permiten su administración desde un controlador lógicamente centralizado (plano de control), el cual se encuentra separada del plano de datos (Ver Figura 2.2). Adicionalmente, es posible programar la red, crear nuevos servicios, introducir rápidamente funciones de red como software, e integrar procesos de red con procesos de IT (Information Technology), usando servicios programables y APIs (Application Program Interface) [32].

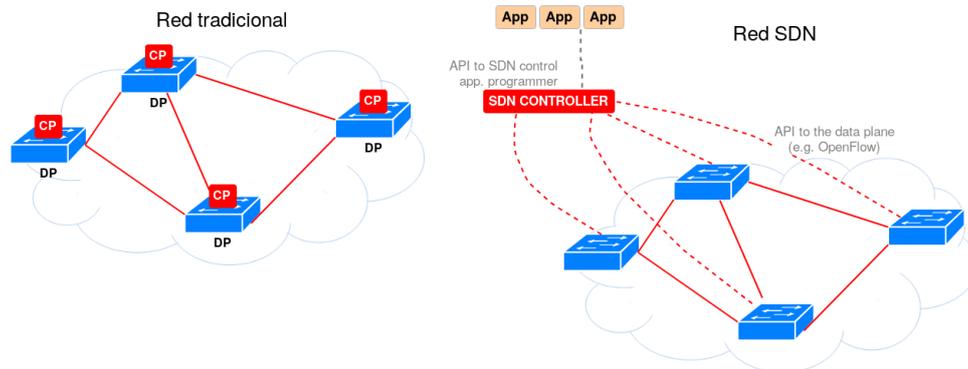


Figura 2.2: Comparación de una red tradicional y una arquitectura de red SDN [21].

2.3.1. SDN aplicado a redes WLAN

Hasta el momento SDN para redes inalámbricas ha probado tener muchos beneficios. Con SDN se realiza aislamiento de tráfico, balanceo de carga, ingeniería de tráfico, entre otras tareas de manera más simple que en redes convencionales [33].

En términos generales SDN puede aportar a las redes inalámbricas en los siguientes aspectos [34]:

- Mejorar la conectividad de usuario final y la calidad de servicio.
- Realización del handoff en redes homogéneas y heterogéneas.
- Localización de usuarios.
- Interoperabilidad entre fabricantes.
- Unificación de la gestión de las redes.
- Configuración dinámica de las redes.
- Aseguramiento de políticas.

2.3.2. Implementación de QoS en SDWN en la tecnología IEEE 802.11

Las redes inalámbricas definidas por software (SDWN) con tecnología IEEE 802.11, proveen beneficios de aprovisionamiento ágil en QoS. Las políticas de QoS pueden ser desarrolladas en el controlador y el consumo de recursos puede ser minimizado. En este campo se propone QoS-flow para OpenFlow, el cual provee primitivas básicas de QoS incluyendo soporte de solo programación FIFO (primero en entrar, primero en salir), pero puede ser insuficiente para algunas aplicaciones como el streaming multimedia [21]. Además las aplicaciones interactivas, como la navegación web, vídeo conferencia, y la transmisión de vídeo en vivo, tienen requerimientos más estrictos de retardo, según la variación de tiempo de llegada de los paquetes o jitter [21].

2.4. Tipos de balanceo de carga en SDN

Existen implementaciones de balanceo de carga en SDN que utilizan algoritmos estáticos y dinámicos, control de asociación [14], en clusters de servidores [35], basados en tiempos de respuesta [26] [27] [28], predictivos como de decisión distribuida o centralizada [15] [26] [36], Round Robin [26], y multi-controlador [26]. La mayoría de los balanceos de carga en SDN están personalizados para una aplicación o producto en particular [26]. A través de una API desarrollada en el controlador, se pueden proporcionar algoritmos de red personalizados.

En términos de QoS en [37] y [38] desarrollan esquemas para optimizar las decisiones de reenvío bajo dos niveles de prioridad, con pruebas experimentales que demuestran el incre-

mento de la calidad de la transmisión con diferentes niveles de congestión de la red. En [39] muestran un proceso eficiente de traspaso y un mayor rendimiento con menores variaciones de jitter entre las estaciones en función de la carga del AP, en el emulador Mininet-WiFi.

Con respecto a métodos dinámicos Wi-Fi con SDN en [15], se incluye un módulo que informa el estado del AP al controlador, y gestiona los dispositivos asociados según las instrucciones del controlador. Otro módulo recibe información de los AP, realiza cálculos de equilibrio de carga e instruye a los APs para tomar las acciones adecuadas en consecuencia. La solución propuesta reduce la congestión de red, al dividir los APs en dos grupos, sobrecargados y subcargados, para manipular el parámetro de nivel de control y así equilibrar la carga entre los AP. De forma similar en [14], proponen un esquema de balanceo de carga adaptativo donde el controlador recolecta la carga de los AP y la situación de conexión de los usuarios; cuando el controlador detecta que la carga de un AP no está balanceada, el controlador adaptativamente organiza los flujos de los AP relevantes. El esquema propuesto verifica la carga del AP en tiempo real y luego desplaza a los usuarios de los puntos de acceso cargados, a los AP con carga ligera, de modo que el rendimiento total es mayor que en otros métodos.

Los avances en la integración de SDN con WLAN posibilitan la creación de plataformas robustas para el diseño de aplicaciones en la capa de infraestructura de una red. En [16] y [17], se centran en la definición de abstracciones de programación reutilizables de alto nivel para la gestión de redes inalámbricas. En [17], presentan Odin, un framework SDN para introducir la capacidad de programación en redes inalámbricas de área local (WLAN). Las WLAN empresariales deben admitir una amplia gama de servicios y funcionalidades. Esto incluye autenticación, autorización, movilidad, gestión de interferencias, y balanceo de carga. Odin [17] y 5G-EmPOWER [16] presentan una abstracción denominada Light Virtual Access Point (LVAPs), que permite la administración de los estados de los dispositivos inalámbricos. Esta abstracción simplifica la administración de la red e introduce soporte para movilidad sin interrupciones. Wi-Balance [40], realiza de forma conjunta asociación del usuario y asignación de canal en redes Wi-Fi, con un desempeño superior a las técnicas basadas en RSSI (Fig. 2.3), también implementada con 5G-EmPOWER.

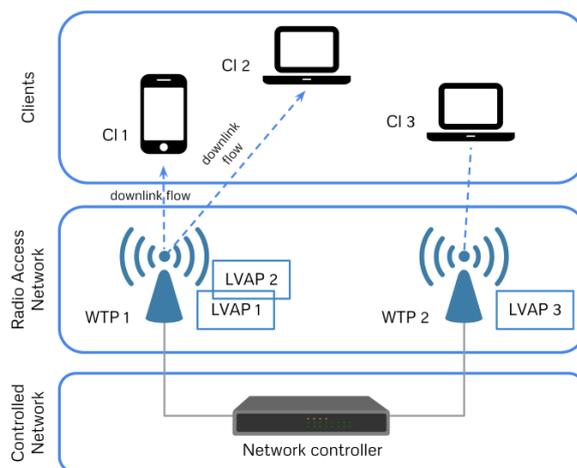


Figura 2.3: Wi-Balance demostración del sistema desplegado [40].

Tabla 2.4: Algoritmos de balanceo de carga con SDN.

Método	Ventajas	Desventajas
* Round-Robin	* Dependiendo del orden de llegada se asigna una solicitud de acceso, independientemente del manejo dado por el controlador [26]. Utiliza una secuencia circular para ejecutar el balanceo de carga [41] [42].	* Este no considera el estado real de los equipos asociados al momento de hacer la distribución [27].
Algoritmos estáticos	* En este algoritmo, de acuerdo con la relación preestablecida, cada entidad de la red obtiene la proporción correspondiente de carga [26].	
* Ratio	* Desarrolla una lógica con respaldos. Cuando la carga no está equilibrada, se habilitará la entidad o dispositivo de respaldo [26].	* El funcionamiento se puede ver afectado si no existe ningún respaldo.
* Priority		
* conexiones mínimas	* Resuelve la distribución con administración de asociaciones [26]. * Detecta periódicamente el número de conexiones que se han establecido entre los dispositivos de la red [26]. * Para una nueva solicitud de acceso, el balanceo de carga envía esta solicitud al dispositivo con menos conexiones [26].	* En casos de muchas solicitudes necesita de más puntos de conexión.

Capítulo 2

Algoritmos dinámicos	<ul style="list-style-type: none"> * Predictivo * Tiempo de respuesta 	<ul style="list-style-type: none"> * El controlador puede predecir el estado de carga de un elemento de la red en el próximo período [26]. * Estima el estado de carga de cada dispositivo en la red, enviando una instrucción de prueba [26]. * El balanceo de carga evita la pérdida de paquetes o retraso cuando se prioriza los tiempos de respuesta y determinar la mejor opción [42] [35]. 	<ul style="list-style-type: none"> * Una cantidad masiva de elementos puede saturar el controlador. * Cuanto más largo es el tiempo de respuesta, mayor es la carga correspondiente [27].
Algoritmo dinámico y adaptativo	DALB, Basado en decisión distribuida [36] (2015)	<ul style="list-style-type: none"> * Se ejecuta como un módulo del controlador, toma decisiones basadas en la información recolectada. * Garantiza la escalabilidad y disponibilidad de los controladores SDN distribuidos. * Periódicamente supervisa su flujo para determinar quién tienen la carga más alta y migrar todas sus actividades al switch con menor carga. 	* La forma en que se usa la decisión se asemeja a la funcionalidad de redes tradicionales.
Algoritmo estático y dinámico	Round-Robin y conexiones mínimas, basado en tiempo de respuesta [26] (2014)	* El promedio de tiempo de respuesta es evaluado para determinar el control del flujo.	* Los balanceadores de carga Round-Robin y el de mínimas conexiones dependen del tiempo de respuesta.
Algoritmo dinámico	LBBSRT, basado en tiempo de respuesta de servidores [27] (2017)	* Mide el promedio de tiempo de respuesta entre servidores para que el controlador realice la distribución de carga.	* El tiempo de respuesta no garantiza el control de otras variables que afectan el flujo.
Algoritmo dinámico	ANOVA, método probabilístico basado en test por puertos [28] (2015)	* El ancho de banda de los servidores y otros dispositivos de red mejora la capacidad de procesamiento de paquetes de datos y el rendimiento de la red para finalmente dar mayor usabilidad y flexibilidad.	* El ancho de banda entre los enlaces no garantiza que el balanceador de carga analice otras variables como la pérdida de paquetes.

		<p>* Cuanto más pequeños sean los valores de la prueba, menores serán las diferencias entre el tráfico de datos monitoreado en cada puerto.</p>	<p>* Debido a que el flujo de datos en la red se selecciona aleatoriamente, el tráfico de cada puerto puede verse como independiente.</p>
Algoritmo dinámico	Control de admisión basado en algoritmos de transferencia [39] (2016)	<p>* Recolecta los datos de cada AP considerando sus estaciones asociadas para determinar una distribución de la carga.</p> <p>* La carga de tráfico se nivela al considerar los AP vecinos a los cuales asociarse, liberando un AP cuando se hace una transferencia.</p>	<p>* No todo el tiempo la cantidad de clientes puede determinar el estado de carga de un AP.</p>
Algoritmo dinámico	TTDLB, Control de asociación, usando la métrica de índice Jain's fairness [15] (2017)	<p>* El rendimiento del equilibrio de carga se evalúa en términos del índice de equidad resultante y el tiempo promedio de reasociación percibido por las estaciones del cliente.</p> <p>* Como es probable que los APs tengan diferentes niveles de carga, el controlador SDN también calcula el nivel de carga promedio del cliente.</p> <p>* También se encarga de clasificar los AP y clientes en alta y baja carga, garantizando una mejor decisión.</p> <p>* El nivel de control sugerido crece linealmente con la diferencia de carga.</p>	<p>* Se puede ver afectado por el nivel de control establecido.</p> <p>* El nivel promedio de carga se envía como una información en bloque a cada AP, junto con el índice de equidad y el nivel de control sugerido.</p>
Algoritmo dinámico adaptativo	Control de asociación [14] (2017)	<p>* La carga promedio permite establecer un punto de redistribución, garantizada a partir del flujo</p> <p>* Facilita una mejor distribución al tener control de los AP y asociaciones.</p>	<p>* Requiere cambios en las estaciones en cuanto a cómo se seleccionan los AP para la asociación.</p> <p>* Requiere cambios en AP para recopilar y difundir información de red a otras estaciones.</p>

			* Puede causar migraciones masivas porque los AP de asociación no manejan transferencias.
Algoritmo dinámico	Control de admisión, con métricas basadas en multi controladores [35] (2018)	<p>* La plataforma utiliza el algoritmo de recopilación de datos para recolectar la información de carga de los controladores.</p> <p>* La carga se equilibra mediante la migración del permiso de control entre controladores distribuidos.</p> <p>* La carga, la memoria disponible y la CPU se toman como funciones de membresía, antes de distribuir la carga entre controladores.</p>	* La distribución del flujo se puede ver afectada por la carga de trabajo del controlador.
Algoritmo dinámico	Wi-balance, administración de asociación [40] (2017)	* Realiza procesos de transferencia para liberar el ancho de banda y rendimiento en un AP.	* Cuando finaliza al menos una de las transmisiones, el algoritmo actualiza la configuración de la red y revierte la transferencia, al estado inicial.

3

Metodologías implementadas para el balanceo de carga en redes inalámbricas SDN

El balanceo de carga en redes inalámbricas es un campo de exploración para diferentes implementaciones, donde el fundamento del capítulo 2, describe cómo se desarrolla en una red tradicional, hasta su integración con SDN. Estas técnicas y algoritmos de balanceo de carga para una distribución de red centralizada, consideran la administración de las asociaciones, el control de admisión y el ajuste de cobertura. Además los tipos de balanceo de carga que se clasifican en algoritmos estáticos, dinámicos y adaptativos, permiten abstraer la información de cuál es el más adecuado para el mejor funcionamiento de la red.

Durante el proceso de investigación, se observa que la mayoría de los algoritmos realizan su demostración al trazar comparaciones estadísticas con la técnica Round-Robin, que independientemente de su clasificación, la sola implementación es un resultado. Así mismo, en diversas fuentes citadas en el capítulo anterior proponen algoritmos dinámicos y la implementación de modelos complejos, incluyendo técnicas de optimización.

Con base en esta tendencia, en la versatilidad y programabilidad de entornos de trabajo SDN para redes inalámbricas disponibles, se desarrollaron los siguientes métodos: Round-Robin (RR), Transfer Client with High Load (TCHL), Best-Fit (BF) y un modelo de optimización (OM), para resolver la distribución de carga de una red inalámbrica. Round-Robin, desarrolla una lógica circular simple de ejecución en la distribución de la red. Transfer Client with High

Load, ejecuta una transferencia del cliente con mayor carga, a otro punto de acceso. Best-Fit, define la mejor alternativa de asociación en la red, que se pueda evaluar y así determina una nueva distribución. El modelo de optimización define la maximización de la capacidad de acuerdo a las restricciones de rendimiento de los usuarios.

3.1. Balanceo de carga con Round-Robin

Un planificador Round-Robin asigna recursos a todos los clientes activos por igual. El esquema Round-Robin (RR) es el más simple y puede implementarse con recursos mínimos de cómputo. Su inconveniente es que la programación no hace diferenciaciones en requisitos no similares de QoS para diferentes clientes y condiciones de canal experimentadas [43]. En la actualidad, los esquemas de planificación de tráfico existentes incluyen principalmente RR, entre otros [28]. Al ser clasificado como algoritmo estático [26], RR es usado en dispositivos que cuentan con limitantes en su rendimiento o procesamiento [27].

3.1.1. Método RR para un AP sin transferencia de clientes

Sean n clientes que desean asociarse a un AP el cual tiene una capacidad máxima C_{AP} , generando una lista de espera. Los clientes tienen un peso de rendimiento R_i según los servicios que estos requieren. A cada cliente se le define un estado en relación al AP, X_i , donde toma el valor 1 si el cliente se asocia con el AP y 0 si el cliente no consigue asociarse o esta en espera. El objetivo principal de RR es maximizar la cantidad total de clientes asociados a un AP, siempre y cuando el acumulado del rendimiento de los clientes no exceda la capacidad máxima del AP.

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{Si el cliente } i \text{ se asocia al AP} \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases}$$

Con las anteriores variables, se describe a RR como un problema de optimización entera, así:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} && \sum_{i=1}^n R_i X_i \\ &\text{sujeto a:} && \sum_{i=1}^n R_i X_i \leq C_{AP} \end{aligned} \tag{3.1}$$

El algoritmo de Round-Robin (Figura 3.1) se encarga de gestionar una lista de clientes asociados o por asociarse a un AP, considerando el orden de conexión. RR permite la asociación de los clientes mientras el AP no llegue a su capacidad máxima. Si el AP se encuentra en la capacidad máxima, al momento de asociar a los clientes, los somete a un tiempo de espera durante el cual estará bloqueado, hasta que se libere un espacio o el AP tenga mejores condiciones de rendimiento. El proceso de selección realiza una gestión en orden, tomando todos los clientes que realizaron la petición de asociación, desde el primero de la lista de los que no pudieron asociarse al AP, para priorizar al más próximo.

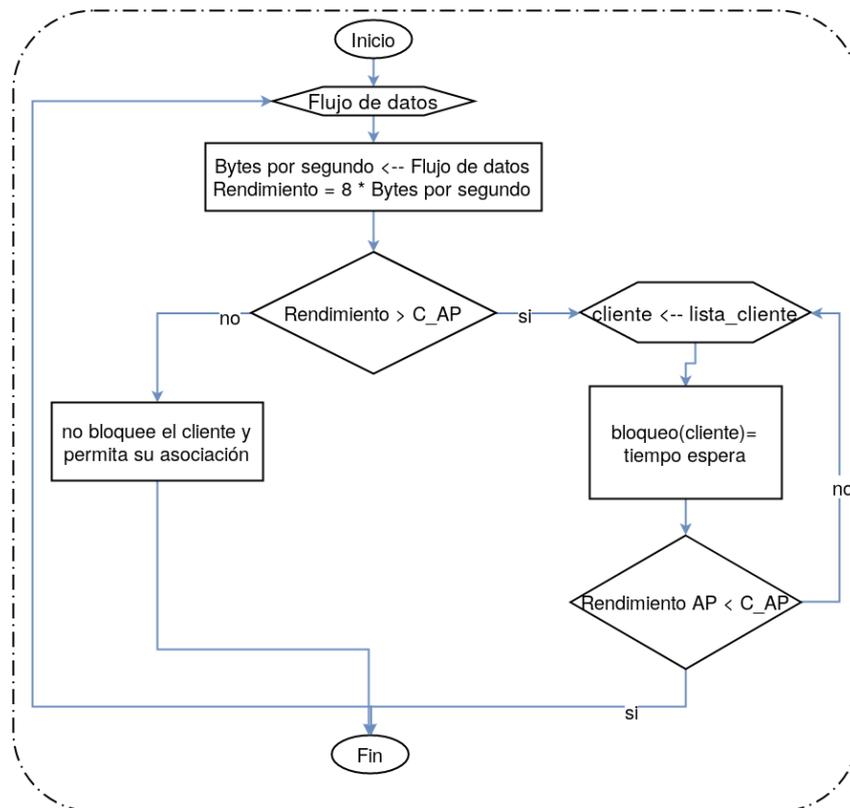


Figura 3.1: Diagrama de flujo RR para un AP.

3.1.2. Método RR para varios AP con transferencia de clientes

Sean n clientes que ahora requieren asociarse a m APs, los cuales tiene una capacidad máxima C_{AP_j} , cada cliente i tienen un peso de rendimiento R_{ij} en el AP j , según los servicios que estos requieren. A cada cliente i se le define un estado en relación al AP, y se representa por X_{ij} , donde toma el valor 1 si el cliente se asocia con al AP j y 0 si el cliente no consigue asociarse. El objetivo principal de RR es maximizar la cantidad total de clientes asociados

a cada AP, siempre y cuando el acumulado del rendimiento de los clientes no exceda la capacidad máxima de los APs. Si los clientes no se pueden asociar generan una lista de candidatos a un proceso de transferencia.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el cliente } i \text{ se asocia al AP } j \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases}$$

Con las anteriores variables, se describe a RR como un problema de optimización entera, así:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} && \sum_{i=1}^n R_{ij} X_{ij}, && i \leq n \\ &\text{sujeto a:} && \sum_{i=1}^n R_{ij} X_{ij} \leq C_{AP_j}, && j \leq m \end{aligned} \tag{3.2}$$

Una posible solución a la anterior formulación se representa en el siguiente diagrama de flujo:

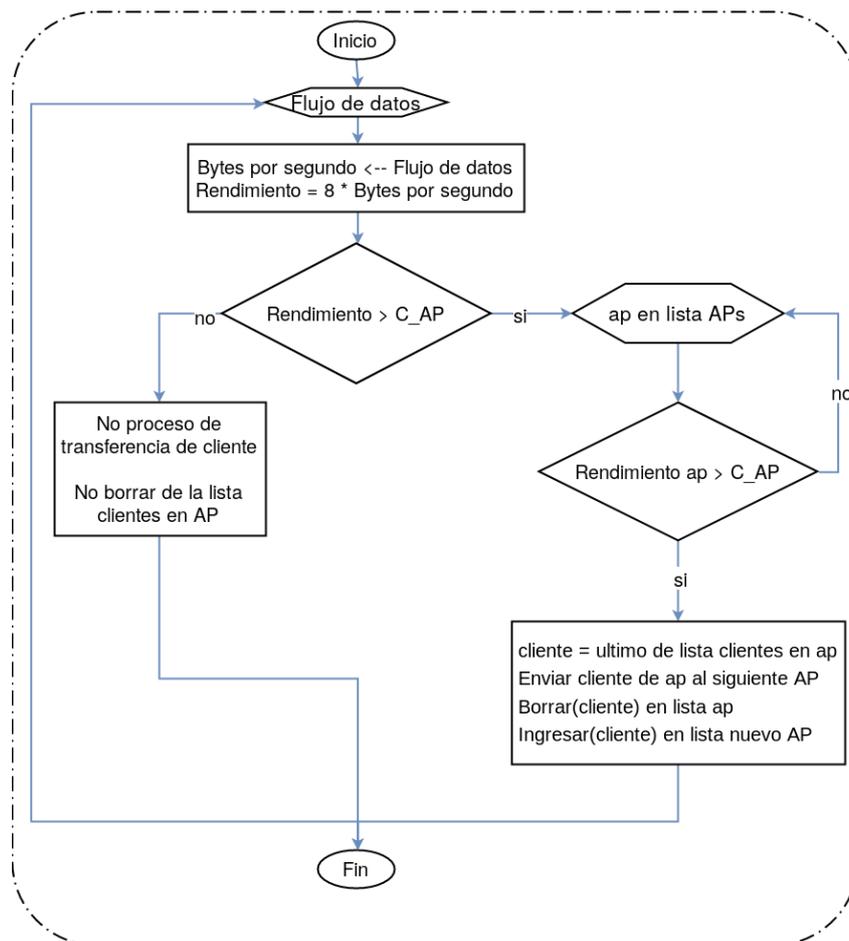


Figura 3.2: Diagrama de flujo RR con varios AP y proceso de transferencia.

El algoritmo Round-Robin (Figura 3.2) para varios AP, distribuye el exceso de la carga a los AP descargados, a través de un proceso de transferencia controlado. El esquema Round-Robin se basa en la gestión de asociación e integra una programación coordinada, equilibrando el rendimiento después de la asociación de las estaciones.

3.2. El problema de empaçado en contenedores

El problema de empaçado en contenedores (Bin Packing Problem - BPP), consiste en colocar n objetos en varios contenedores, donde cada objeto tiene un peso ($W_i > 0$) y cada contenedor tiene una capacidad limitada ($C_j > 0$). Luego, se debe encontrar la mejor distribución de los objetos en los contenedores, minimizando el número de contenedores utilizados, así que el peso total de los objetos en cada contenedor no exceda su capacidad (ver Tabla 3.1) [44].

Tabla 3.1: Explicación de BPP, donde cada elemento son números reales positivos [44].

Objeto	1	2	...	i	n
Peso	W_1	W_2	...	W_i	W_n
Capacidad	C_1	C_2	...	C_j	C_m

Usualmente, todos los contenedores tienen la misma capacidad. Obviamente alojar cada objeto en cada contenedor es una solución factible al problema, pero no es óptima [44].

3.2.1. Empacado de contenedores unidimensional

El problema de empaquetado de contenedores unidimensional (One dimensional bin packing - 1BPP) es uno de los problemas más famosos en la optimización combinatoria. Considerando que BPP es NP-hard, por lo que, además de los enfoques de solución exactos, toma límites inferior y superior para el valor óptimo, así como los métodos de reducción y algunas extensiones [45].

3.2.1.1. Descripción del problema y modelo

El 1BPP se puede definir de la siguiente manera. Toma un conjunto de n elementos, cada uno con un peso entero W_i , $i \in I := \{1, \dots, n\}$, y se asigna un número ilimitado de contenedores con

similar capacidad entera C . El objetivo es empaclar todos los objetos, donde $0 < W_i \leq C, \forall i \in I$, en un número mínimo de contenedores para que el peso total en cualquier contenedor no exceda la capacidad [45]. Con frecuencia, también se considera una definición normalizada de 1BPP. Allí, la capacidad se establece en 1, y por tanto los pesos son números racionales en $(0, 1]$ [45]. Por ejemplo, sea $z = z(E)$ cualquier límite superior del valor óptimo de la instancia E de 1BPP. Esto significa que no se necesitan más de z , $J := \{1, \dots, z\}$, contenedores para empaclar todos los objetos sin exceder la capacidad del contenedor. Para modelar el 1BPP como un problema de programación lineal entera (ILP), presentamos dos tipos de variables binarias [45]:

$$Y_j = \begin{cases} 1 & \text{Si el contenedor } j \text{ es usado en la solución} \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad j \in J$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el objeto } i \text{ es empaclado en el contenedor } j \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad i \in I, j \in J$$

Entonces, un modelo ILP del 1BPP es el siguiente [45]:

$$\begin{aligned} z^{BPP} = z^{BPP}(E) := \text{minimizar} & \quad \sum_{j \in J} Y_j \\ \text{sujeto a:} & \quad \sum_{i \in I} W_i X_{ij} \leq C_{Y_j}, j \in J \\ & \quad \sum_{j \in J} X_{ij} = 1, i \in I \end{aligned} \quad (3.3)$$

De acuerdo con la anterior formulación, el objetivo es minimizar el número de contenedores utilizados, con la restricción de no exceder la capacidad de cada contenedor usado, y que todos los objetos estén empaclados. Teniendo en cuenta que, el número de variables binarias depende del número n de elementos y del límite superior z , resolver el modelo ILP puede ser muy costoso [45].

3.2.2. Heurísticas

El BPP pertenece a la clase de problemas NP-hard y dado que no se conoce un algoritmo óptimo para ejecutarlo en tiempo polinómico, se propusieron algoritmos heurísticos para tratarlo. Estas heurísticas son técnicas voraces caracterizadas por la adopción de reglas simples, como el siguiente ajuste (Next-Fit, NF), el primer ajuste (First-Fit, FF) o el mejor ajuste (Best-Fit, BF) [44].

- **Siguiente ajuste:** El enfoque heurístico más simple para el BPP es el algoritmo del siguiente ajuste (NF). Recibe los objetos en el orden dado, el primer objeto se asigna al contenedor 1, luego, los demás objetos se asignan al contenedor actual si caben. De lo contrario, se asignan a un nuevo contenedor, repitiendo el proceso hasta ubicar todos los objetos [44] [45].
- **Primer ajuste:** El algoritmo FF también considera los objetos de acuerdo a sus índices crecientes. Pero cada objeto se asigna al contenedor con el índice más bajo habilitado en el que quepa. Cuando un objeto no puede ingresarse en un contenedor, se abre uno nuevo para poder empacar el objeto [44] [45].
- **Mejor ajuste:** El algoritmo BF es una modificación del algoritmo FF pero asignando el objeto actual al contenedor factible que tiene la menor capacidad residual. Si no cabe en ningún contenedor, abre uno nuevo y se empaca el objeto en el nuevo contenedor [45] [44].

Cuando los objetos son ordenados decrecientemente en los algoritmos NE, FF o BF, tienen complejidad $O(n \log n)$, y se denominan: siguiente ajuste decreciente (Next-Fit decreasing, NFD), primer ajuste decreciente (first-fit decreasing, FFD), y mejor ajuste decreciente (best-fit Decreasing, BFD). Estas heurísticas se usan generalmente para validar la eficacia nuevos algoritmos propuestos en BPP [44].

Para casos de decisión no muy complejos, el modelo ILP del 1BPP, presentado anteriormente, se puede utilizar para obtener soluciones óptimas [45]. Así mismo, el uso de alguna de las heurísticas consignadas como limite al BPP, puede reducir el tiempo de solución para implementar un balanceo de carga.

3.3. Método BF con transferencia de clientes

El algoritmo BF se ha utilizado en aplicaciones en la nube [46], y servidores de streaming [47]. El desarrollo de este algoritmo BF se ve reflejado con el diagrama de flujo en la Figura 3.3. Best-Fit mantiene los intervalos en el orden decreciente de sus niveles, donde el nivel de un conjunto es el tamaño total de los elementos.

Best-Fit, define la mejor alternativa de asociación en la red, que se pueda evaluar y así determina una nueva distribución. Luego de haber explorado el estado lógico de decisión de

BF como algoritmo de distribución para BPP, al igual que los anteriores algoritmos busca balancear la carga teniendo en cuenta los clientes para realizar una distribución total de la red (Figura 3.3).

BF en su estado de decisión clasifica a los clientes en un orden decreciente, para asignarlos a los AP dentro de la red. Este algoritmo realiza una evaluación en el controlador de la misma forma que RR y TCHL, tomando las lista de clientes en los punto de acceso siempre que se supere el límite establecido, para proceder a hacer la transferencia; en primer lugar el algoritmo establece las condiciones de los clientes y los puntos de acceso, luego procede a asignar los clientes dependiendo del orden de sus listas, realizando una transferencia entre los AP, omitiendo aquellos clientes que aún se conservan en el mismo AP.

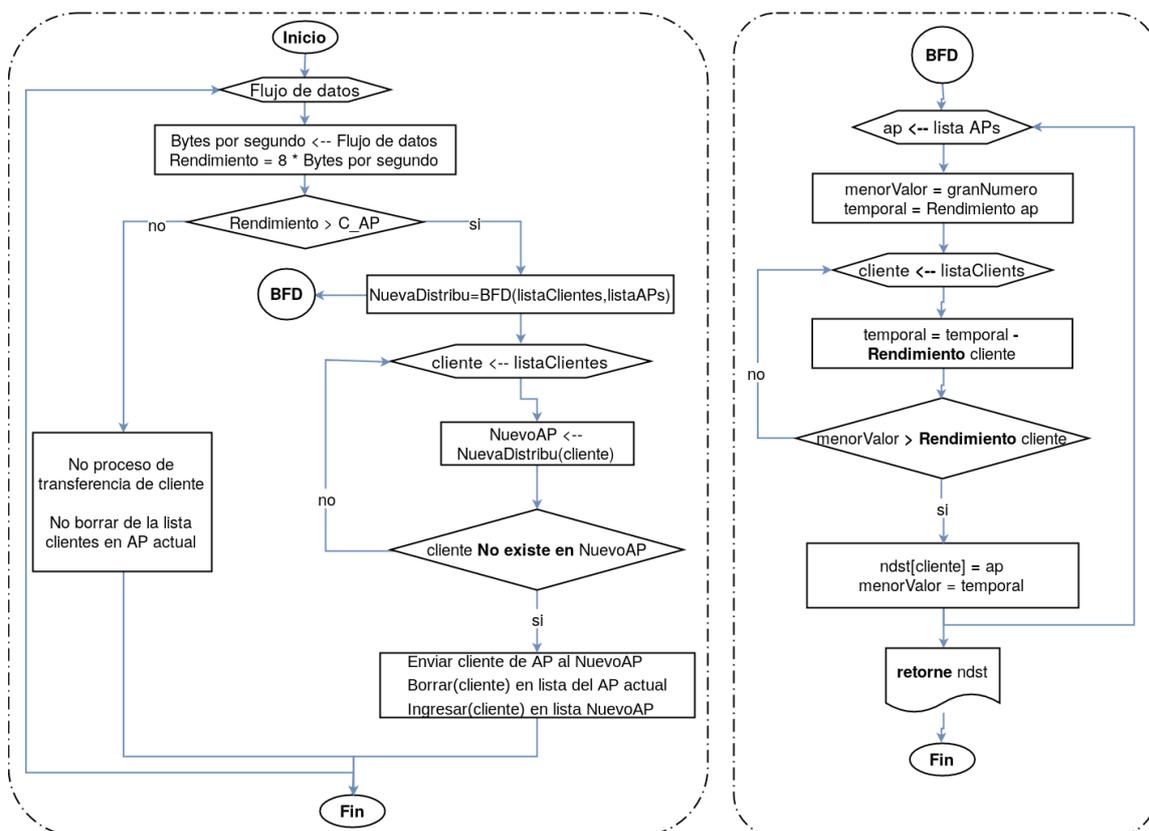


Figura 3.3: Diagrama de flujo BF con varios AP y proceso de transferencia.

BF, se puede clasificar dentro de los algoritmos dinámicos como un balanceo de carga personalizado [26] [48], además, es uno de los algoritmos de solución integrado en el estado de decisión usado en el BPP.

3.4. Método TCHL con transferencia de clientes

Siguiendo una lógica similar al algoritmo BF, se implementó una variación donde el estado de decisión es inferido por la condición del cliente con la carga mayor o el más alto consumo de rendimiento (Fig. 3.4).

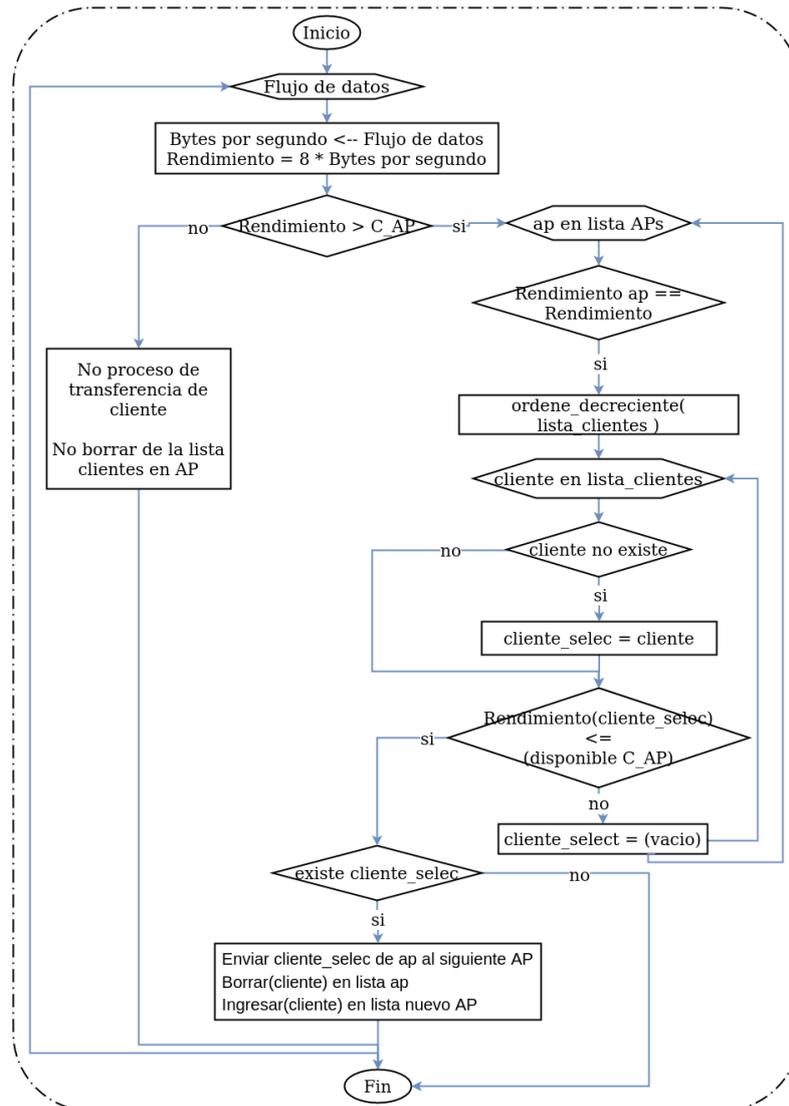


Figura 3.4: Diagrama de flujo TCHL con varios AP y proceso de transferencia.

Este algoritmo realiza una evaluación en el controlador de la misma forma que Round-Robin, tomando una lista de clientes en el punto de acceso que supere el límite establecido, para proceder a hacer la transferencia; en primer lugar el algoritmo establece las condiciones de cada cliente y busca el de mayor consumo de rendimiento o la carga más alta. Después,

simplemente selecciona al punto de acceso no sobrecargado y realiza la transferencia del cliente con mayor carga (TCHL) para nivelar y establecer una mejor distribución, siempre y cuando el punto de acceso tenga el espacio suficiente en el cual albergar al cliente. Este algoritmo, se puede clasificar dentro de los algoritmos dinámicos como un balanceo de carga personalizado [26] [48]. Se implementó como acercamiento inicial del problema de empaquetado (BPP).

3.5. Método OM con transferencia de clientes

El BPP puede resolverse de manera óptima para instancias de tamaño razonable con programación lineal entera [47] [49]. En esta implementación, el objetivo es distribuir las cargas dentro de lo posible en un número mínimo de APs, verificando que la carga asignada no supere la capacidad máxima en cada AP [47] [49]. Siguiendo la formulación planteada en [46], [47] y [50], se propone una solución que sigue la formulación explorada. (ver Figuras 3.5 y 3.6).

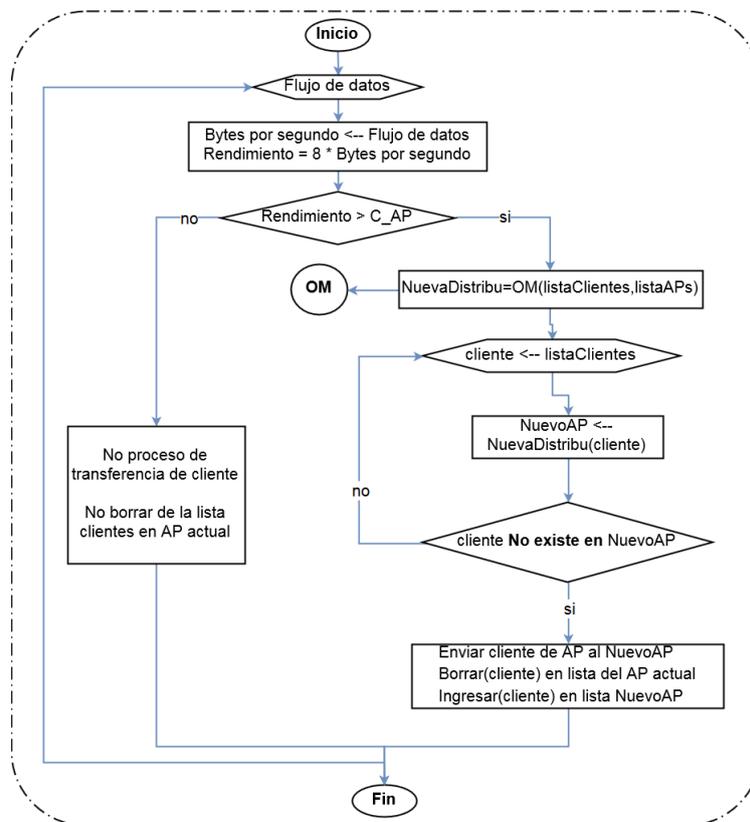


Figura 3.5: Diagrama de flujo OM (decisión) con varios AP y proceso de transferencia.

Al igual que los anteriores algoritmos, este se clasifica dentro de los algoritmos dinámicos como un balanceo de carga personalizado [26] [48], ya que lo que se hace es ejecutar un estado de distribución en paralelo al estado de decisión y es el resultado del uso de BPP como algoritmo de distribución. Basado en la formulación del BPP (ecuación 3.3) el algoritmo, luego de que el estado de decisión (Figura 3.5) recolecta los datos tanto de los AP como de sus clientes asociados, envía los datos a el algoritmo de BPP (Figura 3.6) desarrollando un estado de distribución a partir de los datos recolectados. Al igual que los anteriores algoritmos de RR, TCHL y BF, toma sus datos iniciales de listas de clientes y puntos de acceso, resuelve la nueva distribución, considerando las condiciones de selección decrecientes entre clientes y devuelve esta distribución al estado de decisión para que ejecute el proceso de transferencia.

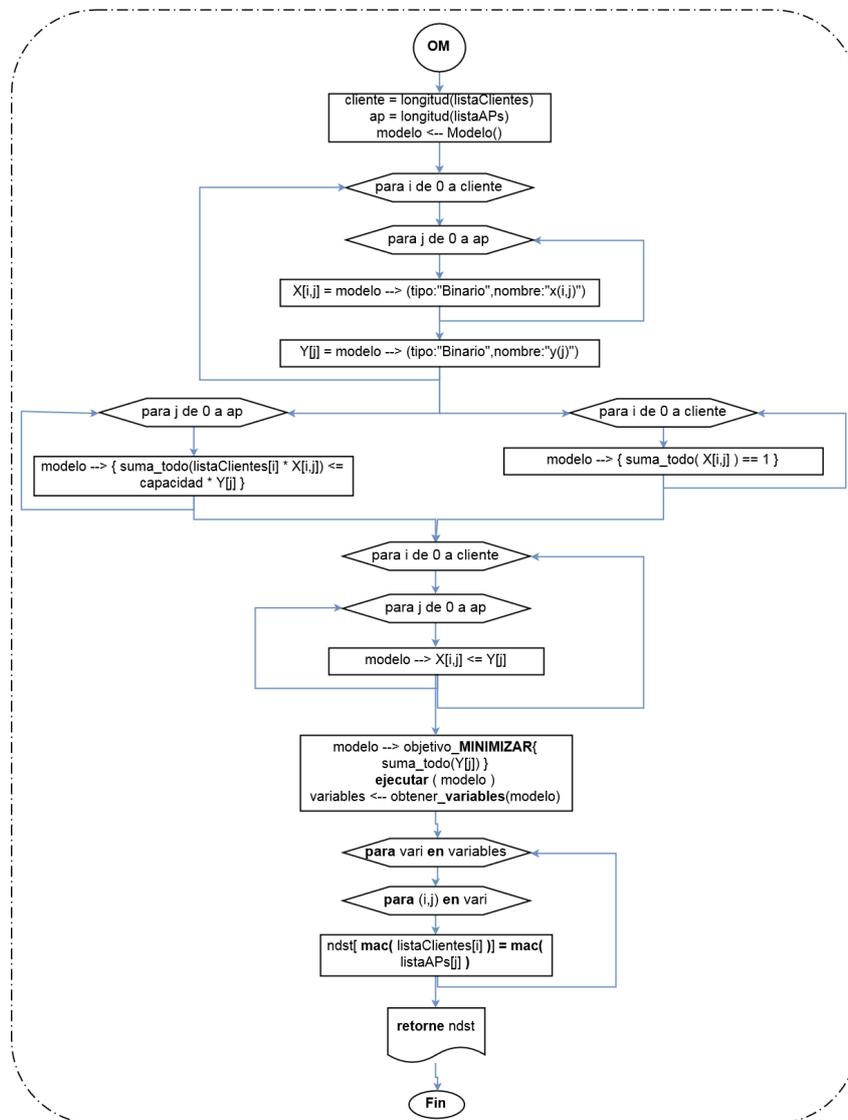


Figura 3.6: Diagrama de flujo OM (distribución) con varios AP y proceso de transferencia.

3.5.1. Formulación MIP mas fuerte

Una solución factible de un valor dado U , el cual es menor de cierta cantidad desconocida ($U < m$) de APs es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} && \sum_{j=1}^U Y_j \\
 &\text{subjeto a:} && \sum_{j=1}^U X_{ij} = 1 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \\
 &&& \sum_{i=1}^n R_i X_{ij} \leq C_{ap} Y_j \quad \text{para } j = 1, \dots, U \\
 &\text{de peso:} && X_{ij} \leq Y_j \quad \text{para } i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, U \\
 &&& X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{para } i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, U \\
 &&& Y_j \in \{0, 1\} \quad \text{para } j = 1, \dots, U
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Las restricciones de peso proporcionan una mejora en la formulación, indicando que si un AP no es usado ($Y_j = 0$), los clientes no se pueden asociar a este ($X_{ij} = 0$). Al agregar este tipo de restricciones se espera un mayor rendimiento. En este caso, C_{ap} representa el rendimiento límite de un punto de acceso o capacidad máxima, Y toma valor 1 si un punto de acceso es utilizado y 0 si no, y X representa si un cliente está asignado en un punto de acceso tomando valores 1 o 0. Además, R representa la cantidad de carga asociada a cada cliente, en este caso es cuanto consume cada cliente. Donde U representa un número indeterminado de APs que se pueden habilitar o usar, dependiendo de las necesidades del modelo, y n es la cantidad total de clientes dispuestos a asociarse a un AP.

La formulación de BPP organiza a todos los clientes en puntos de acceso determinados, para proporcionar mejores condiciones de carga y resolver el estado de la red con una buena distribución, aprovechando las condiciones presentadas.

El primer ajuste decreciente (First-Fit decreasing - FFD) es computacionalmente eficiente y puede usarse para proveer el número de APs U para la formulación de programación lineal entera (ILP), o proporcionar una solución inicial para algoritmos heurísticos mas avanzados [51].

3.5.1.1. Primer ajuste decreciente

En el algoritmo FFD, los objetos se ordenan de forma decreciente y aplica FF para asignar cada objeto a un contenedor. Si el objeto no cabe en el contenedor habilita uno nuevo y empaca el objeto [52] [45].

Algoritmo 1 : Primer ajuste decreciente

Input: n - número de objetos; w - lista de pesos; W - capacidad contenedor

Output: B - número de contenedores necesarios; Sol - lista de asignaciones

```

procedure FFD( $N, w, W$ )
     $w \leftarrow reverse(sort(w))$ ;
     $B \leftarrow 0$ ;
     $Sol \leftarrow []$ ;
     $Rem \leftarrow []$ ;
    for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
         $S \leftarrow \{j | 1 \leq j \leq B, Rem[j] \geq w_i\}$ ;
        if  $S \neq \emptyset$  then
             $j \leftarrow min(S)$ ;
             $Rem[j] \leftarrow Rem[j] - w_i$ ;
             $Sol.append(w_i \rightarrow bin\ j)$ ;
        else
             $B \leftarrow B + 1$ ;
             $Rem.append(W - w_i)$ ;
             $Sol.append(w_i \rightarrow bin\ B)$ ;
        end if
    end for
    return ( $B, Sol$ );
end procedure

```

El algoritmo 1 muestra cómo se puede calcular una solución FFD. En este algoritmo, B es el número actual de puntos de acceso, Sol es la lista de asignaciones, donde una asignación de un cliente, con peso o consumo de rendimiento w_i , a un AP k se representa como $w_i \rightarrow bin\ k$, y $Rem[j]$ es la capacidad disponible actual en el $bin\ j$. Para cada cliente, se busca el AP con suficiente espacio disponible, para ubicarlo. El algoritmo se limita a ordenar los clientes e identificar el AP con espacio disponible [52]

4

Implementación de un prototipo de red WLAN-SDN

En este capítulo se presenta la implementación del prototipo de red inalámbrica IEEE 802.11, integrada con SDN, para evaluar la calidad de servicio en la transmisión de vídeo. El diagrama de bloques de la Figura 4.1 muestra la unidad experimental desarrollada, para la verificación y validación de los algoritmos de asignación de recursos analizados en el capítulo anterior.

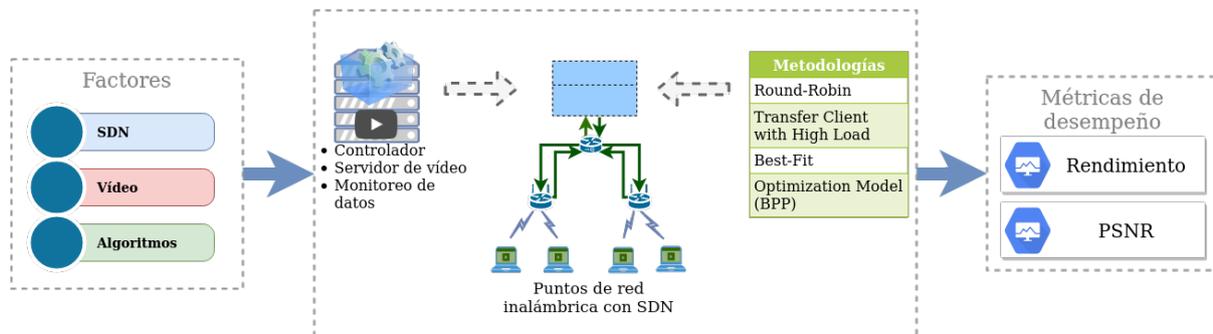


Figura 4.1: Unidad experimental.

4.1. Prototipo de red inalámbrica WLAN con SDN

La unidad experimental se implementó con un prototipo de red inalámbrica basado en el estándar IEEE 802.11, siguiendo una arquitectura de red escalable y centralizada como SDN. El prototipo utiliza tecnología disponible y configurable para los controladores POX y 5G-EmPOWER. La Figura 4.2 describe la tecnología del prototipo de red inalámbrica desarrollado.

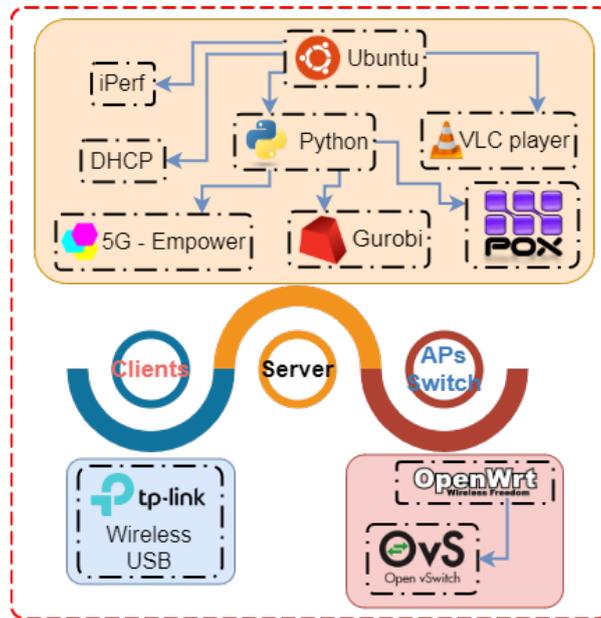


Figura 4.2: Tecnología utilizada (software y hardware).

4.1.1. Tecnología utilizada

4.1.1.1. Controlador POX

Es una plataforma de software de red escrita en Python. Comenzó como un controlador OpenFlow, pero ahora también puede funcionar como un conmutador OpenFlow y es útil para escribir software de red. Actualmente, POX se comunica con los conmutadores OpenFlow 1.0 e incluye soporte especial para las extensiones OpenvSwitch / Nicira [53] [54].

4.1.1.2. Controlador 5G-EmPOWER

Es un sistema operativo abierto para redes móviles. Su arquitectura flexible y las API de programación de alto nivel permiten la creación rápida de prototipos de nuevos servicios y aplicaciones. Además es una plataforma para el desarrollo ágil de servicios 5G, proporcionando un ecosistema donde los nuevos servicios se pueden probar en condiciones reales [55] [53].

4.1.1.3. Gurobi

Gurobi es un software capaz de resolver problemas de optimización, en programación lineal (LP), programación cuadrática (QP) y la programación entera mixta (MILP y MIQP). Este software, ayuda a tomar mejores decisiones a través del uso de análisis prescriptivo, proporcionando una herramienta para solución de modelos a través de programación matemática, con elementos para la optimización distribuida y optimización en la nube [56]. También, tiene una API desarrollada en Python, por medio de la cual se puede interactuar con diversas aplicaciones soportadas bajo este lenguaje.

4.1.1.4. OpenWrt

Es un sistema operativo Linux dirigido a dispositivos integrados. OpenWrt proporciona un sistema de archivos completamente configurable con administración de paquetes, sin la limitación de aplicaciones propietarias, para adaptarse a cualquier aplicación. Para los desarrolladores, OpenWrt es el entorno para desarrollar una aplicación sin tener que construir un firmware completo a su alrededor; para los usuarios, significa la capacidad de personalización completa del dispositivo [57].

4.1.1.5. iPerf

Iperf3 es una herramienta para mediciones activas del ancho de banda máximo alcanzable en redes IP. Admite el ajuste de varios parámetros relacionados con el tiempo, las memorias internas y los protocolos TCP, UDP, SCTP con IPV4 e IPV6. Iperf3 en cada prueba informa el ancho de banda, la pérdida y otros parámetros. Adicionalmente permite las características de sus versiones anteriores, como la saturación de canal, siendo una versión más fresca y equipada para las medidas en todo tipo de escenarios [58].

4.1.1.6. Open vSwitch

Open vSwitch es un conmutador virtual multicapa que funciona bajo la licencia de código abierto. Está diseñado para permitir la automatización masiva de la red, a través de la extensión programática, para interfaces y protocolos estándar de administración (NetFlow, sFlow,

IPFIX, RSPAN, CLI, LACP, 802.1ag, OpenFlow) [59]. Además, permite la configuración de los dispositivos AP al integrarse junto con OpenWrt [57].

4.1.2. Arquitectura de red

La arquitectura de 5G-EmPOWER esta dividida en tres capas: Infraestructura, Control y Servicios (Fig. 4.3). En la capa de infraestructura están los elementos del plano de datos. Aquí se encuentran los puntos de terminación de red (WTPs) para referirse al dispositivo físico que provee la conectividad inalámbrica o puntos de acceso (APs) [55]. Además, un Procesador de Paquetes Click (CPP) donde los nodos combinan capacidades computacionales y de reenvío de paquetes. En la capa de control está la ejecución de 5G-EmPOWER que traduce las políticas de control, administrando los recursos de la red [55].

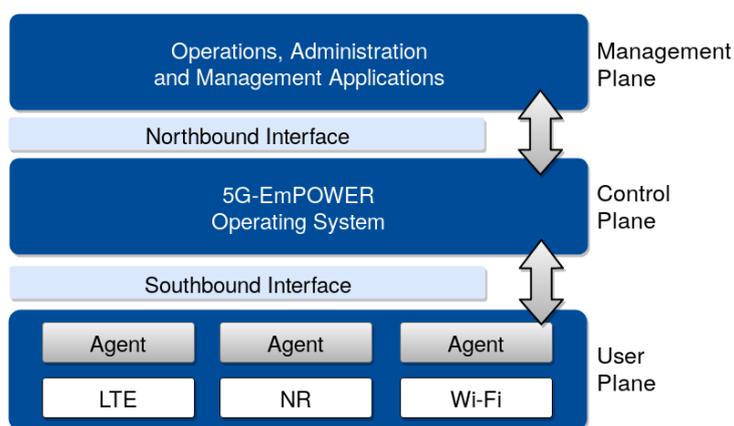


Figura 4.3: Arquitectura de 5G-EmPOWER [55].

Se pueden describir dos arquitecturas básicas en 5G-EmPOWER, la primera usa puntos inalámbricos terminales (WTP) o dispositivos WiFi; la segunda usa una interfaz de control junto a los WTP, hay una tercera configuración orientada a redes LTE, pero, este proyecto solo toma la primera, realizada únicamente con WTPs. Donde, esta es una arquitectura sencilla de red, que tiene un conjunto de APs conectados al controlador por medio de switches, la configuración IP para los clientes y WTP es gestionada por un servidor DHCP [55].

4.1.3. Movilidad utilizando puntos de acceso virtuales

El agente WiFi, en la arquitectura de 5G-EmPOWER, integra las abstracciones de WTP (Wireless Termination Points) y LVAP (Light Virtual Access Point). Además, este agente registra

métricas relacionadas con la conexión inalámbrica, como estadísticas de enlaces y canales, número de paquetes transmitidos, esquema de modulación y codificación utilizado a través de la interfaz aérea, RSSI, relación de pérdida de trama, etc. [55] [60].

- **WTP:** Los WTP son los dispositivos físicos que manejan la comunicación de bajo nivel con los clientes. Los WTP son esencialmente puntos de acceso WiFi que ejecutan el agente 5G-EmPOWER LVAP [55].
- **LVAP:** Esta abstracción llamada Light Virtual AP (LVAP), simplifica y desacopla la asociación/autenticación desde la conexión física entre clientes y AP [55] [60] [16]. La abstracción LVAP permite tomar el control de las decisiones de asociación del cliente y conduce a un aislamiento lógico de los clientes con respecto al MAC 802.11 [16].

La abstracción LVAP crea un AP virtual para cada cliente asociado al AP (WTP) mediante la asignación de un BSSID único (es decir, cada cliente asume que tiene un AP dedicado). De esta forma, se puede lograr un procedimiento de transferencia eficiente migrando un LVAP entre dos AP físicos, ya que no es necesario volver a asociar o autenticar de nuevo al cliente [55] [60] [16].

4.2. Configuración del prototipo de red

Este proyecto utiliza dos prototipos de red constituidos para los controladores POX y 5G-EmPOWER, el primero se diseñó como una etapa de aproximación inicial a la implementación de los algoritmos, y el segundo se diseñó con el fin de poder emplear un proceso de transferencia, siendo este último el modelo definitivo de la red.

De forma general cada enrutador viene con su propio firmware diseñado por el fabricante, este firmware puede cambiarse por uno de código abierto, como lo es OpenWrt, el cual debe ser compatible según la lista ofrecida por OpenWrt [57]. El dispositivo seleccionado para nuestro prototipo es el TP-LINK Archer C7, configurado con OpenWrt y OpenvSwitch, habilitando de esta forma la comunicación mediante el protocolo OpenFlow [61].

4.2.1. Prototipo de red utilizando el controlador POX

Este prototipo de red SDN cuenta con un solo punto de acceso, donde se instalan las reglas de flujo y las reglas de balanceo de carga que se definen en el controlador. El controlador POX se encuentra en el lado del servidor junto con un servicio DHCP para asignar el direccionamiento IP a los clientes, y un servicio de vídeo utilizando el reproductor VLC, como se puede ver en la Figura 4.4.

Para el controlador POX solo se ha implementado el balanceo de carga basado en Round-Robin, donde el controlador principal además de tener una visión general de la red, monitorea el rendimiento.

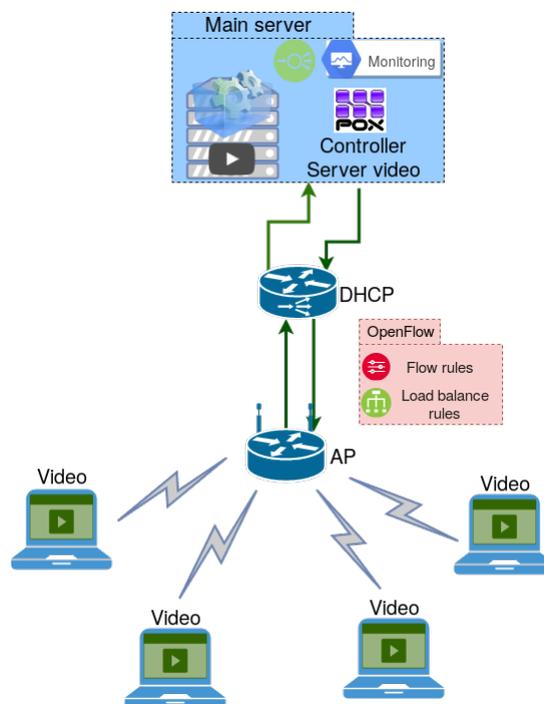


Figura 4.4: Prototipo de red con POX.

4.2.2. Prototipo de red utilizando el controlador 5G-EmPOWER

Este prototipo de red SDN cuenta con dos puntos de acceso donde se instalan las reglas de flujo, las aplicaciones de balanceo de carga, y los LVAPs, que se definen en el controlador. El controlador 5G-EmPOWER se encuentra en el lado del servidor junto con un servicio DHCP para asignar el direccionamiento IP a los clientes, un servicio de iPerf y un servicio de vídeo

utilizando el reproductor VLC, como se puede ver en la Figura 4.5.

En el controlador 5G-EmPOWER se implementaron cuatro balanceos de carga, el primero basado en Round-Robin (RR), el segundo basado en la transferencia del cliente con alta carga o el mayor consumo (Transfer client with high load - TCHL), el tercero basado en la mejor decisión (Best-Fit - BF) y el último utilizando el modelo de optimización del BPP (Optimization model BPP - OM). El controlador principal, además de tener un visión general de la red, toma la decisión de que cliente someter al proceso de transferencia, y monitorea el rendimiento de cada AP para evaluar la calidad de servicio.

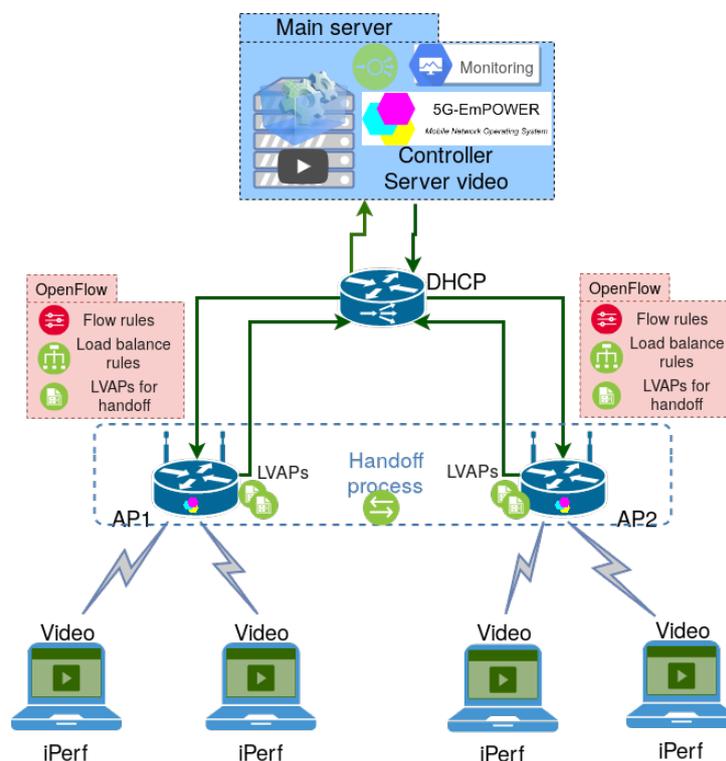


Figura 4.5: Prototipo de red con 5G-EmPOWER.

4.3. Factores

Los parámetros de entrada de la unidad experimental o prototipo de red, son algoritmos de balanceo de carga, la utilización de SDN y el streaming de vídeo.

4.3.1. Algoritmos de balanceo de carga

Este proyecto presenta la implementación de las aplicaciones de equilibrio de carga descritas como: Round-Robin (RR), Transfer Client with High Load (TCHL), Best Fit (BF) y el Modelo de optimización basado en BPP (OM). Con un solo AP se desplegó solamente el algoritmo Round-Robin, desarrollado en POX, y luego se elaboró su extensión a múltiples AP, incluido un proceso de transferencia, utilizando 5G-EmPOWER.

4.3.2. Algoritmo RR para balanceo de carga con un AP

Este algoritmo sigue la lógica detallada en el diagrama de flujo RR para un AP (Figura 3.1), donde realiza el balanceo de carga a partir del bloqueo de los clientes.

Algoritmo 2 RR en un AP sin proceso de transferencia de clientes

```

procedure ROUNDROBIN
  while flow do
    bytesPerSecond ← flow
    throughput := 8 * bytes/second
    if throughput > limit then
      for ap ← listof APs do
        if ap(throughput) == throughput then
          client = last(lstclients)
          drop(lstclients(client))
        end if
      end for
      if exist client then
        clientsBlck(client) := blck(lstclients(client))
        elapseTime(cliente) := timeBlock
      end if
    else
      for client ← clientsBlocked do
        if elapseTime(cliente) == 0 then
          lstclients.add(client)
          unblock(clientsBlck(client))
          drop(clientsBlck(client))
        end if
      end for
    end if
  end while
end procedure

```

4.3.3. Algoritmo RR para balanceo de carga con varios AP

Este algoritmo sigue la lógica detallada en el diagrama de flujo RR con varios AP y proceso de transferencia (Figura 3.2), donde realiza el balanceo de carga a partir de la transferencia de clientes.

Algoritmo 3 : RR para varios AP con proceso de transferencia

```
procedure ROUNDROBIN
  while flow do
    bytesPerSecond ← flow
    throughput := 8 * bytesPerSecond
    if throughput > limit then
      for ap ← listof APs do
        if ap(throughput) == throughput then
          client = last(listclients)
        end if
      end for
      if exist client then
        handoff(listclients(client)) = listAP(nextAP)
        drop(listclients(client))
      end if
    end if
  end while
end procedure
```

4.3.4. Algoritmo TCHL para balanceo de carga con varios AP

Este algoritmo sigue la lógica detallada en el diagrama de flujo TCHL con varios AP y proceso de transferencia (Figura 3.4), donde realiza el balanceo de carga a partir de la transferencia de clientes, respecto al rendimiento del AP.

Algoritmo 4 : TCHL para varios AP con proceso de transferencia

```

procedure SCLIENTHIGHLOAD
  while flow do
    bytesPerSecond ← flow
    throughput := 8 * bytesPerSecond
    if throughput > limit then
      for ap ← listof APs do
        if ap(throughput) == throughput then
          lstclients.sort(reverse = True)
          for cli ← lstclients do
            if cli.get(throughput) <= (limit - nextAP(throughput)) then
              if Not exist client then
                client = cli
              end if
            end if
          end for
        end if
      end for
      if exist client then
        handoff(lstclients(client)) = lstAP(nextAP)
        drop(listclients(client))
      end if
    end if
  end while
end procedure

```

4.3.5. Algoritmo BF para balanceo de carga con varios AP

Este algoritmo sigue la lógica detallada en el diagrama de flujo BF con varios AP y proceso de transferencia (Figura 3.3), donde realiza el balanceo de carga a partir de la transferencia de clientes, logrando una distribución total de la red.

Algoritmo 5 : BF para varios AP con proceso de transferencia

```

procedure BESTFIT
  while flow do
    bytesPerSecond ← flow
    throughput := 8 * bytesPerSecond
    if throughput > limit then
      Ndst = BFD(lstclients, lstAP)
      for cli ← lstclients do
        newAP = Ndst(cli)
        if cli Not exist in newAP then
          handoff(lstclients(cli)) = lstAP(newAP)
          drop(listclients(cli))
        end if
      end for
    end if
  end while
end procedure

procedure BFD
  lowest = 2e6
  for ap ← lstAP do
    temp = ap[throughput]
    for cl ← lstclients do
      temp = temp - int(cl[throughput])
      if lowest > int(cl[throughput]) then
        ndst[cl] = ap
        lowest = temp
      end if
    end for
  end for
  lowest = 2e6
  return ndst
end procedure

```

4.3.6. Algoritmo OM para balanceo de carga con varios AP

Este algoritmo sigue la lógica del modelo de optimización BPP (ecuación 3.4), el cual según su formulación detallada en el Método OM (Figuras 3.5 y 3.6), desarrolla una distribución de clientes en un número indeterminado de APs, dependiendo del rendimiento evaluado. Para luego lograr una distribución total de la red.

Algoritmo 6 : OM para varios AP con proceso de transferencia

```

procedure CONTROLLERDECISION
  while flow do
    bytesPerSecond ← flow
    throughput := 8 * bytesPerSecond
    if throughput > limit then
      Ndst = OptimizationModel(lstclients, lstAP)
      for cli ← Ndst do
        newAP = Ndst(cli)
        if cli Not exist in newAP then
          handoff(lstclients(cli)) = lstAP(newAP)
          drop(listclients(cli))
        end if
      end for
    end if
  end while
end procedure

procedure OPTIMIZATIONMODEL
  cli = len(lstclients)
  ap = len(lstAP)
  model ← Model()
  for i ← range(cli) do
    for j ← range(ap) do
      x[i, j] = model → (type: "Binary", name: "x(i, j)")
    end for
  end for
  for j ← range(ap) do
    y[j] = model → (type: "Binary", name: "y(j)")
  end for
  for i ← range(cli) do
    model → sumAll(x[i, j]) == 1
  end for
  for j ← range(ap) do
    model → sumAll(lstclients[i] * x[i, j]) <= limit * y[j]
  end for
  for j ← range(ap) do
    for i ← range(cli) do
      model → x[i, j] <= y[j]
    end for
  end for
  model → Objective_MINIMIZEsumAll(y[j])
  optimize(model)
  vars ← getVars(model)
  for x ← vars do
    for (i, j) ← x do
      ndst[mac(lstclients[i])] = mac(lstAP[j])
    end for
  end for
  return ndst
end procedure

```

4.3.7. SDN

Los prototipos de red están configurados para el funcionamiento con SDN y sin SDN, de donde se toma como prototipo definitivo la implementación orientada hacia el controlador 5G-EmPOWER. En este proceso la red tradicional es el mismo prototipo de red sin utilizar SDN ni balanceo de carga, pero habilitando 802.11e con el objetivo de comparar la calidad de vídeo medida en ambas redes.

4.3.8. Vídeo

La unidad experimental al someterse a pruebas con flujo de vídeo en un entorno saturado, permite una aproximación a un entorno con diferentes aplicaciones en el prototipo de red. El vídeo seleccionado es "BigBuckBunny.mp4", con resolución de 1280×720 px.

Para los experimentos, se usa el umbral descrito en los algoritmos como un limitador, el cual está establecido en 2 Mbps de rendimiento desde el controlador, donde los algoritmos de balanceo de carga serán evaluados con variación en la cantidad de clientes, en este caso 3, 4 y 5 clientes. En todas las condiciones se supervisará el rendimiento y se captura el vídeo en los clientes, para someterlo a evaluación con el uso de la métrica de calidad de vídeo PSNR. Más adelante se detallan los parámetros experimentales y la cantidad de experimentos.

4.4. Métricas de desempeño

Condicionada bajo los factores de diseño, la unidad experimental presenta resultados para evaluar la calidad de servicio en la transmisión de vídeo, y determinar la mejora del desempeño al implementar diferentes algoritmos de balanceo de carga.

4.4.1. Rendimiento

Es la media de bits entregados correctamente en la red por unidad de tiempo. En el caso de los escenarios de experimentación, se mide en los AP utilizando los comando disponibles en las API de POX y 5G-EmPower. De forma general, esta variable se puede calcular con la ecuación 4.1.

$$Rendimiento = 8 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N TX_i + RX_i}{t} \quad (4.1)$$

Donde:

N Es el número de paquetes que llegan a su destino.

TX_i Es la cantidad de Bytes transmitidos del paquete i .

RX_i Es es la cantidad de Bytes recibidos del paquete i .

t Es el tiempo en segundos que toma el paquete en el canal.

4.4.2. PSNR

La estimación de la calidad del vídeo, con medidas objetivas, están basadas en obtener las diferencias píxel a píxel, entre las imágenes originales (previo a la compresión y transmisión) y las imágenes degradadas (luego de la recepción y reconstrucción) [62]. Una forma tradicional de evaluar la calidad de vídeo es la relación señal a ruido de pico **PSNR** (Peak Signal to Noise Ratio), basada en el error cuadrático medio **MSE** (Mean Square Error) [63].

El MSE se calcula con la siguiente ecuación:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|(I(i, j) - K(i, j))\|^2 \quad (4.2)$$

Donde M es la cantidad de filas en el array de un frame que corresponde a una imagen en todo el vídeo, N es la cantidad de columnas en el array de un frame que corresponde a una imagen en todo el vídeo, $I(i, j)$ representa a cada frame extraído del vídeo original, y $K(i, j)$ representa a cada frame extraído del vídeo recibido o capturado

Entonces el PSNR se expresa como:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \text{ dB} \quad (4.3)$$

4.5. Recolección de datos

Para este proceso, el controlador POX tiene integrado un módulo de estadísticas, que al momento de instanciarlo desde la programación con Python en el controlador, podemos capturar cada evento. Los eventos nos entregan variables como la cuenta de bytes o cantidad de bytes, la duración en segundos de un paquete en el canal y la duración en nanosegundos, entre otros. De estos elementos entregados por cada evento se realiza el cálculo del rendimiento (Throughput), acumulando los que pertenecen al mismo evento, como se ve en la fórmula 4.4.

$$\text{Rendimiento} = \sum \frac{8 * \text{cantidadBytes}}{\text{duracionSegundos} + \frac{\text{duracionNanosegundos}}{1000000000}} \quad (4.4)$$

Por otra parte, el controlador 5G-EmPOWER también cuenta con un módulo de estadísticas específico para la red WiFi. En el módulo de estadísticas se recibe la información de los paquetes transmitidos en bytes por segundo, y los paquetes recibidos en bytes por segundo de cada cliente o LVAP asociado a un punto de acceso. Con estas variables el controlador calcula el rendimiento en cada punto de acceso, como se ve en la fórmula 4.5.

$$\text{Rendimiento} = 8 * (\text{bytes_transmitidos_por_segundo} + \text{bytes_recibidos_por_segundo}) \quad (4.5)$$

Para la transmisión del vídeo se utiliza el reproductor VLC como servidor y como cliente, donde usando comandos por consola podemos almacenar el vídeo en transmisión correspondiente a cada dirección IP asignada. Al terminar el proceso de captura se tienen copias del vídeo original respecto a cada uno de los escenarios presentados en la red, con los cuales se puede realizar el proceso de comparación utilizando la métrica PSNR.

4.5.1. Algoritmo para la estimación de PSNR

El algoritmo 7, sigue la formulación del PSNR como métrica de desempeño y se deriva de las ecuaciones 4.2, y 4.3, para la estimación de la calidad de vídeo entre un original y una copia. El despliegue de este algoritmo se desarrolla en código Python con la ayuda de la librería OpenCV. OpenCV es una biblioteca de software de aprendizaje y visión por computadora de

código abierto [64]. Además, permite el cálculo del MSE (ecuación 4.2), con sus algoritmos de similitud entre imágenes [64].

Algoritmo 7 PSNR entre dos vídeos

```
procedure QUALITYOFVIDEO(VIDEO1,VIDEO2)
  cumulative = 0
  PSNR = 0
  while True do
    ret1, frame1 ← video1
    ret2, frame2 ← video2
    if ret1 is True and ret2 is True then
      mse = mean((frame1 - frame2)2)
      if mse == 0 then
        cumulative += 100
      else
        cumulative += absolute(10 · log10((2552) ÷ mse))
      end if
    else
      break
    end if
  end while
  PSNR = cumulative ÷ len(video1)
  print PSNR
end procedure
```

La unidad experimental (Figura 4.1) que define el uso de los algoritmos en la implementación del prototipo de red, orientado a las tecnologías dentro del despliegue de los controladores POX y 5G-EmPOWER, expone los resultados en el siguiente capítulo para la evaluación del desempeño de los esquemas de balanceo de carga, junto con la determinación de la calidad de vídeo.

5

Evaluación de desempeño de los esquemas de balanceo de carga en el prototipo WLAN-SDN

En este capítulo se evalúa el desempeño de los algoritmos de balanceo de carga en el prototipo de red, de acuerdo con la unidad experimental definida en el capítulo anterior. En los controladores, se habilitan los módulos para recolección de datos con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de los algoritmos de balanceo de carga propuestos (RR, BF, TCHL, y OM), de acuerdo con las métricas de desempeño definidas: rendimiento y PSNR. De esta manera, se analizan los resultados obtenidos en topologías de 3, 4 y 5 clientes, con máximo dos puntos de acceso inalámbrico. Para el proceso de comparación con una red tradicional, se usan las mismas topologías sin ejecutar el controlador ni los algoritmos de balanceo. Adicionalmente, se habilitan en OpenWrt las características de calidad de servicio, referentes al estándar IEEE 802.11.

Tabla 5.1: Detalles de vídeo.

Parámetros	Valor
Vídeo	"BigBuckBunny.mp4" [®]
Resolución	1280 × 720 px
Códec	H.264
Bit Rate	461 Kbps
Frames	30 fps

Tabla 5.2: Configuración experimental.

Parámetros	Valor
Tiempo transmisión	10 minutos
Nº de experimentos totales	119
Umbral de rendimiento	2 Mbps
Protocolo iPerf	TCP
iPerf bit rate	0.02 Mbps

Tabla 5.3: Software.

Parámetros	Valor
Sistema operativo	Ubuntu 18.04.2 LTS
OpenWrt	18.06
OpenFlow	1.0
VLC Player	3.0.4 Vetinari
Iperf3	3.1.3
Gurobi	8.1.1

Tabla 5.4: Hardware.

Parámetros	Valor
CPU servidor	Generic
RAM servidor	24 Gb
Procesador	Intel Xeon
AP	TP-link Archer C7 v2
Wireless USB	TP-link WN823N

Los parámetros experimentales para evaluar el desempeño del prototipo WLAN-SDN, se detallan en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3, y 5.4. En la Tabla 5.5 se muestran los factores, la configuración de red, los controladores POX y 5G-EmPOWER y las métricas utilizadas para la definición del experimento.

Tabla 5.5: Detalle de experimentos.

Algoritmo	Clientes	AP	Métrica desempeño	Nº experimentos	iPerf
RR POX	3	1	Rendimiento	4	✗
	4	1	Rendimiento	4	✗
	5	1	Rendimiento	5	✗
RR	3	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
5G-EmPOWER	4	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
	5	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
TCHL	3	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
5G-EmPOWER	4	2	Rendimiento y PSNR	8	✓
	5	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
BF	3	2	Rendimiento y PSNR	8	✓
5G-EmPOWER	4	2	Rendimiento y PSNR	10	✓
	5	2	Rendimiento y PSNR	6	✓
OM	3	2	Rendimiento y PSNR	8	✓
5G-EmPOWER	4	2	Rendimiento y PSNR	10	✓
	5	2	Rendimiento y PSNR	8	✓
Sin	3	1	Rendimiento	2	✗
Algoritmo, tradicional	4	1	Rendimiento	2	✗
	5	1	Rendimiento	2	✗
Tradicional (sin balanceo)	3	2	Rendimiento y PSNR	4	✓
	4	2	Rendimiento y PSNR	4	✓
	5	2	Rendimiento y PSNR	4	✓
Total Experimentos				119	

5.1. Evaluación del rendimiento en la transmisión de vídeo para los esquemas de balanceo de carga implementados

Las métricas de rendimiento se obtienen de acuerdo a las ecuaciones 4.4 y 4.5, disponibles en los módulos de recopilación de estadísticas de los controladores POX y 5G-EmPOWER. Adicionalmente, en cada uno de los algoritmos se ha impuesto un limitador, desde el controlador, como una medida de máxima capacidad del canal (ver Tabla 5.2), debido a que el proceso experimental solo se pudo llevar a cabo con pocas cantidades de clientes. De igual forma, en la red tradicional se conserva el efecto del limitador, gracias a la configuración que ofrece OpenWrt.

5.1.1. Round Robin para un AP en POX

En el algoritmo de Round-Robin (Alg. 2), cada vez que el límite de rendimiento es superado se selecciona al siguiente cliente que desea conectarse y se le somete a un proceso de bloqueo temporal hasta que se balancea la carga. En este proceso, los clientes se habilitan en el punto de acceso en orden distinto, garantizando que el cliente seleccionado por el algoritmo sea diferente.

En el controlador POX, los resultados presentados en las Figuras 5.1a, 5.1b y 5.1c, muestran el balanceo de carga en acción, manteniendo los flujos aceptados alrededor del límite establecido y en paralelo los resultados sin balanceo de carga (Fig. 5.2a, 5.2b y 5.2c). A medida que aumenta el número de clientes, el rendimiento presenta una mayor variación debido a los nuevos clientes. Luego, si se excede el límite impuesto desde el controlador, se asigna un tiempo de espera hasta que uno o más clientes finalicen su transmisión de vídeo.

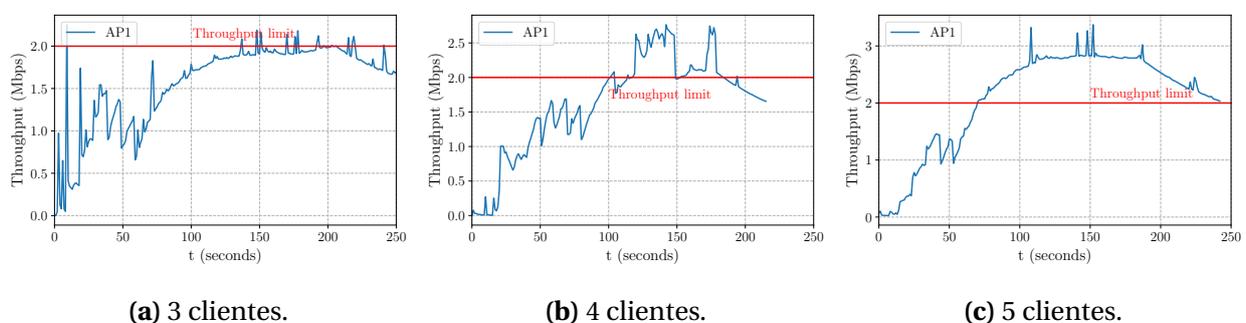


Figura 5.1: Resultados RR con 3, 4 y 5 clientes.

En comparación con una red tradicional (Tabla 5.6), el rendimiento de RR-POX es mayor, considerando la lista de espera de Round-Robin que hace un seguimiento de los clientes rechazados, sin degradar la calidad de servicio de los clientes aceptados.

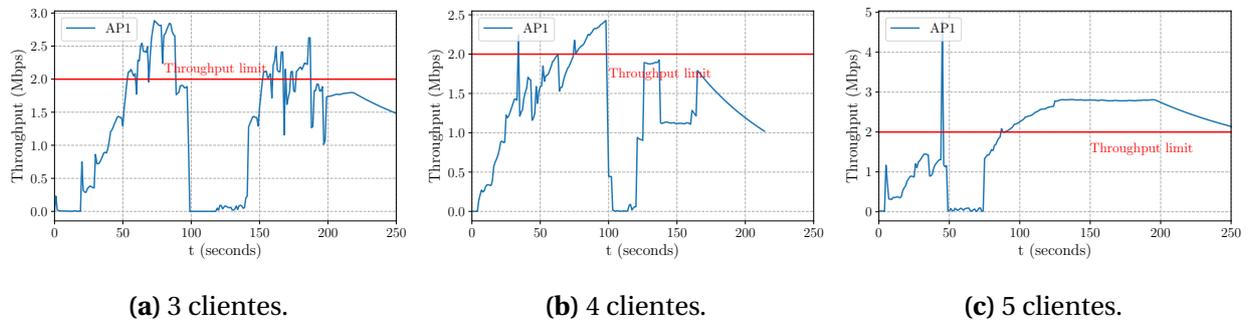


Figura 5.2: Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.

Tabla 5.6: Rendimiento promedio comparando RR-POX con la red tradicional.

Clientes	Balanceo de carga	Tradicional
3	1.57 Mbps	1.33 Mbps
4	1.62 Mbps	1.27 Mbps
5	2.08 Mbps	1.94 Mbps

Los resultados obtenidos en la red tradicional, para poder compararla con el prototipo utilizando el controlador POX, muestra (Figuras 5.2a, 5.2b y 5.2c), rendimiento cero debido al efecto del bloqueo impuesto en esta red tradicional; el bloqueo se produce luego de presentar estadísticas superiores al limite de máxima capacidad de canal. Entonces, en relación con la red tradicional, una red definida por software es más estable en cuanto a su conexión y transmisión de datos. Aquí el controlador en el prototipo realiza un control de admisión de los clientes a la red, como se puede ver en las figuras, donde el rendimiento de los usuarios trata de mantenerse alrededor de la máxima capacidad de canal.

5.1.2. Round Robin con transferencia de clientes en 5G-EmPOWER

Los resultados obtenidos con el controlador 5G-EmPOWER incluye el proceso de transferencia, a diferencia de la previa implementación realizada en el controlador POX.

El algoritmo (Alg. 3) también supervisa el rendimiento, pero en lugar de bloquear a los clientes, ahora incluye un proceso de transferencia de los clientes a otro punto de acceso (AP). Nuevamente, el proceso Round-Robin selecciona el último cliente conectado, de una lista de clientes por AP, y transfiere a este cliente a la lista de clientes activos en el siguiente AP, tomando una lista de puntos de acceso disponibles. Si el rendimiento continúa por encima del umbral de saturación del canal en el siguiente AP, el esquema de equilibrio de carga transfiere el último cliente conectado a otro AP disponible, eliminando al cliente de la lista de clientes activos en el AP anterior.

El proceso de transferencia que realiza la implementación del algoritmo 3 de Round-Robin, se ejecuta cada que se cumple el límite impuesto, logrando una distribución adecuada de los clientes.

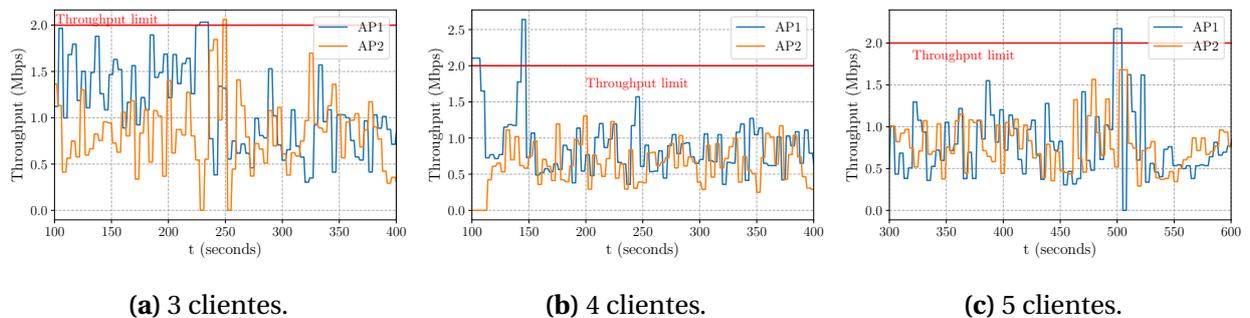


Figura 5.3: Resultados RR con 3, 4 y 5 clientes.

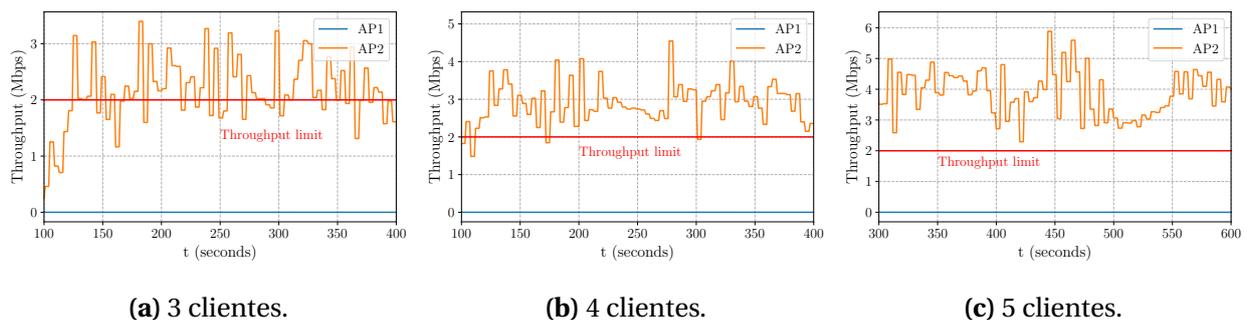


Figura 5.4: Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.

El experimento con tres clientes refleja el resultado del rendimiento como se puede ver en la Figura 5.3a. Este rendimiento es medido en un entorno saturado con la ayuda de iPerf3. En este caso el algoritmo 3 distribuye los clientes para nivelar las cargas y no permitir que se supere el límite establecido por largos periodos de tiempo.

El algoritmo de balanceo de carga es responsable de realizar una respuesta inmediata, como se puede apreciar en la Figura 5.3a, en situaciones de picos altos cuando se supera el límite, durante un proceso de transferencia cuando los clientes cambian de un punto de acceso a otro. Debido a la rápida transferencia el rendimiento en el vídeo se mantiene casi sin pérdidas. El rendimiento en comparación a la red tradicional (Figura 5.4a) muestra un estado de saturación, por encima del límite.

En la Figura 5.3b, se puede apreciar como al superarse el límite (100s) en el AP1, el controlador empieza a realizar el proceso de transferencia hacia el otro punto de acceso, hasta lograr un estado estable en la distribución (después de 150s) del rendimiento (cada AP queda con dos clientes); aún en un entorno saturado el controlador permite el mejor comportamiento de los datos respecto a la red tradicional (Figura 5.4b), la cual supera el límite establecido y lleva el rendimiento hasta un punto que necesita de mayor capacidad del canal.

En la Figura 5.3c, se ve el intercambio del rendimiento al trabajar con cinco clientes; durante un periodo de tiempo el punto de acceso 1 presenta la mayor carga de clientes, luego este regula el rendimiento al hacer una distribución más estable, mientras el punto de acceso 2 presenta el rendimiento consumido por los clientes que tiene asociado. El resultado muestra que el rendimiento se mantiene bajo el límite, a pesar de ser un entorno con saturación, y el controlador logra estabilizar la red en las condiciones indicadas. En la red tradicional (Figura 5.4c) con esta cantidad de clientes, de nuevo se supera el límite establecido.

La Tabla 5.7, muestra con mayor detalle el rendimiento promedio, calculado con los resultados obtenidos en relación a 3, 4 y 5 clientes, tanto para la red tradicional, como para la red ejecutando el controlador. Como se puede apreciar la cantidad promedio no supera a la que se presenta en un solo punto de acceso para la red tradicional. De igual forma los promedios de rendimiento son similares para cada AP, ilustrando el cumplimiento del balanceo de carga.

Tabla 5.7: Rendimiento promedio comparando RR - 5G-EmPOWER con la red tradicional.

Clientes	lb AP1	lb AP2	normal AP1	normal AP2
3	1.11 Mbps	0.84 Mbps	0.0 Mbps	2.15 Mbps
4	0.89 Mbps	0.64 Mbps	0.0 Mbps	2.89 Mbps
5	0.80 Mbps	0.78 Mbps	0.0 Mbps	3.86 Mbps

5.1.3. Transferencia de cliente con mayor carga en 5G-EmPOWER (TCHL)

El algoritmo 4, evalúa el rendimiento de los clientes para determinar la cantidad de recursos de canal que estos usan, y una vez se supera el límite en el punto de acceso, ejecuta un proceso de búsqueda del cliente con el mayor consumo de carga para seleccionarlo como candidato de transferencia. En esta parte el algoritmo hace uso de medidas de rendimiento respecto a un umbral de 2 Mbps, que al igual que en Round-Robin simula una saturación de canal en cada AP. Siempre que se cumpla con el límite impuesto, el proceso de selección y transferencia se repetirá, acomodando la distribución de la red hasta que la cantidad de clientes sea adecuada y se nivele el rendimiento.

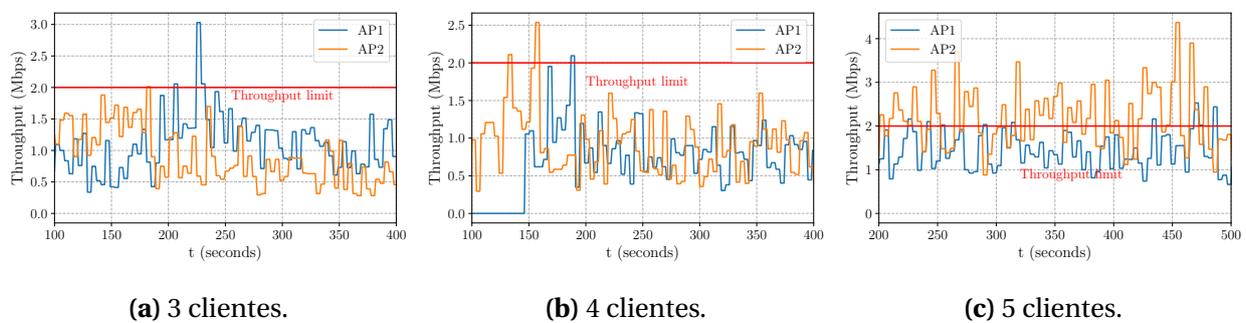


Figura 5.5: Resultados TCHL con 3, 4 y 5 clientes.

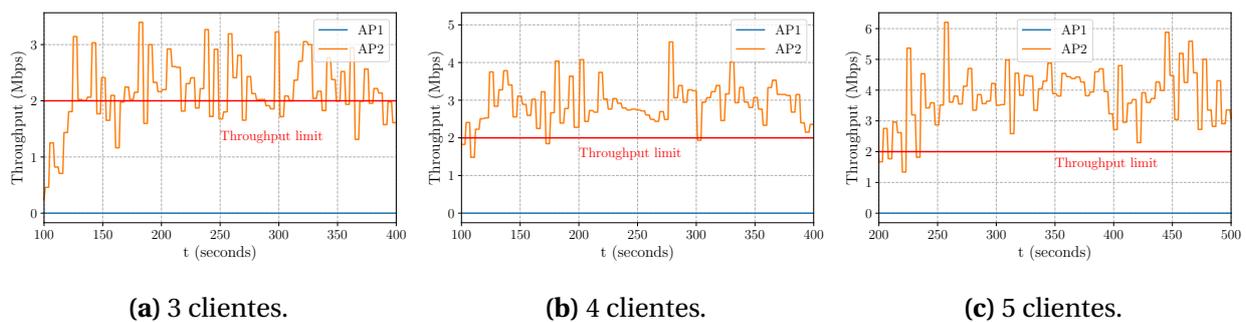


Figura 5.6: Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.

La Figura 5.5a, muestra cómo el algoritmo 4 distribuye un cliente (180s) del AP1 al AP2, para nivelar las cargas y no permitir que se supere el límite establecido. En este resultado el algoritmo realiza tres cambios del cliente (180s, 210s y 230s) con el mayor consumo de rendimiento entre los puntos de acceso, logrando una distribución que evita la saturación.

En la Figura 5.5b, se puede apreciar como al superarse el límite en el AP2 (en 140s), quien tiene inicialmente todos los clientes asociados, empieza a distribuir al cliente con mayor consumo realizando el proceso de transferencia hacia el AP1. El proceso de transferencia se efectúa hasta lograr una distribución adecuada, y presentar condiciones similares en el rendimiento de los dos puntos de acceso. La saturación que se induce con iPerf3, afecta el resultado al mostrar altas medidas, pero el controlador permite el mejor comportamiento de los datos respecto a la red tradicional (Figura 5.6b), la cual supera el límite establecido y lleva el rendimiento hasta un punto que necesita de mayor capacidad del canal.

En la Figura 5.5c, se aprecia cómo afecta la cantidad de conexiones y la saturación del medio, no se realiza la transferencia al trabajar con cinco clientes, y el AP 2 presenta mayor consumo de rendimiento. En comparación a la red tradicional (Figura 5.6c) con esta cantidad de clientes, se ve que el rendimiento, a pesar de superar el límite se mantiene más bajo con el balanceo de carga.

La Tabla 5.8, muestra el rendimiento promedio en relación a 3, 4 y 5 clientes, tanto para la red tradicional como para la red ejecutando el controlador con el algoritmo TCHL. Los resultados de la red tradicional solo se muestran en un AP ya todos los clientes se asocian al AP2.

Tabla 5.8: Rendimiento promedio comparando TCHL - 5G-EmPOWER con la red tradicional.

Clientes	Ib AP1	Ib AP2	normal AP1	normal AP2
3	0.91 Mbps	0.80 Mbps	0.0 Mbps	2.15 Mbps
4	0.92 Mbps	0.93 Mbps	0.0 Mbps	2.89 Mbps
5	1.43 Mbps	2.19 Mbps	0.0 Mbps	3.80 Mbps

Usando TCHL con 4 clientes presenta un promedio de rendimiento similar, pero la red tradicional muestra mayor consumo de rendimiento. De igual forma sucede con 3 y 5 clientes, donde los promedios independientes de cada AP no superan al promedio de la red tradicional.

5.1.4. Mejor ajuste con transferencia de clientes en 5G-EmPOWER (BF)

El algoritmo Best-Fit (Alg. 5), conlleva un proceso de redistribución de todos los clientes conectados a los puntos de acceso, realizando el proceso de transferencia en tiempo real. El algoritmo 5, en la etapa de decisión, evalúa el rendimiento de todos los asociados independientemente del AP. En este caso resulta una nueva distribución de los clientes en los puntos

de acceso, aprovechando al máximo la capacidad disponible. Además, válida si los clientes a reasignar existen en el AP de destino, si no existen ejecuta su transferencia, en caso contrario no modifica ninguna asociación. Los resultados obtenidos con BF para 3, 4 y 5 clientes son los siguientes:

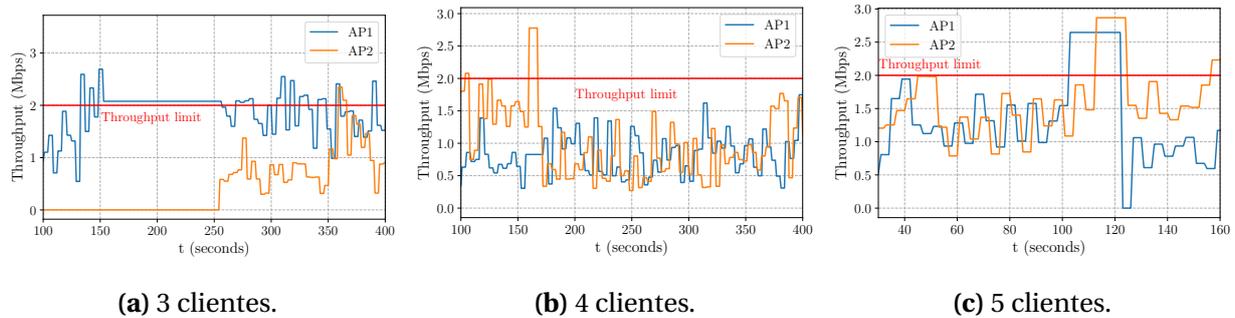


Figura 5.7: Resultados BF con 3, 4 y 5 clientes.

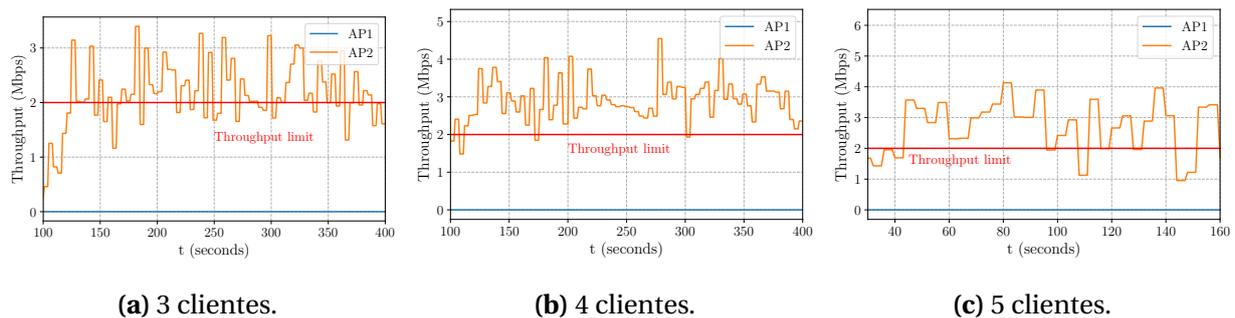


Figura 5.8: Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.

Con tres clientes, por un periodo de tiempo el AP1 tiene toda la carga de la red, la cual refleja la saturación usando iPerf3. La Figura 5.7a, indica cómo el algoritmo BF distribuye los clientes entre los puntos de acceso para nivelar las cargas tratando de mantener el límite establecido. La nueva distribución permite una estabilidad de la red luego de los 250 segundos transcurridos.

En la Figura 5.7b, se puede apreciar como al superarse el límite en el AP2 (en 160s), el controlador procede a hacer una nueva distribución, logrando que durante un periodo de tiempo, el cual va desde los 200 segundos a los 400 segundos, los datos de rendimiento se mantengan similares. En la red tradicional (Figura 5.8b), al igual que en las otras implementaciones los resultados muestran la ventaja de la red SDN, observando las medidas tomadas.

En la Figura 5.7c, se puede apreciar que la cantidad de clientes empieza a afectar aún más el rendimiento. El controlador trata de mantener la carga alrededor del límite. En comparación a la red tradicional (Fig. 5.8c) con esta cantidad de clientes, se nota mejor rendimiento, pero las condiciones en las que se presenta el balanceo no son las más adecuadas ya que se requiere un AP adicional. Aun así logra mantenerse bajo el límite, caso que no ocurre en la tradicional.

La Tabla 5.9, muestra el rendimiento promedio, tanto para la red tradicional como para la red ejecutando el controlador con el algoritmo Best-Fit.

Tabla 5.9: Rendimiento promedio comparando BF - 5G-EmPOWER con la red tradicional.

Clientes	lb AP1	lb AP2	normal AP1	normal AP2
3	1.23 Mbps	0.53 Mbps	0.0 Mbps	2.16 Mbps
4	0.83 Mbps	0.99 Mbps	0.0 Mbps	2.89 Mbps
5	1.81 Mbps	1.01 Mbps	0.0 Mbps	3.34 Mbps

Los resultados para tres clientes presentan valores no muy adecuados en un AP, donde las condiciones son más estables en el AP2, aunque ambos AP no superan el límite. Con 4 clientes es un caso diferente, ya que el controlador logra estabilizar el rendimiento. Se esperan estos resultados considerando el número par de clientes. Con 5 clientes es el mismo caso que con tres, solo que BF logra mejorar los resultados tanto en relación a la red tradicional y a los resultados con 3 clientes en un solo AP.

5.1.5. Método de optimización en 5G-EmPOWER (OM)

El algoritmo OM (Alg. 6) realiza un proceso de transferencia, adecuándose a la implementación real planteada, para balancear la carga teniendo en cuenta los clientes asociados, siguiendo la formulación basada en el BPP.

En este caso el modelo de optimización se ejecuta cuando el rendimiento supera el límite y la parte de monitoreo envía al controlador la distribución actual. Luego, el modelo de optimización encuentra una solución factible, con Gurobi, para una distribución más apropiada con respecto a las condiciones de la red. Finalmente, los puntos de acceso reciben la nueva distribución de los clientes y somete a aquellos que no están en sus puntos de acceso respectivos a un proceso de transferencia.

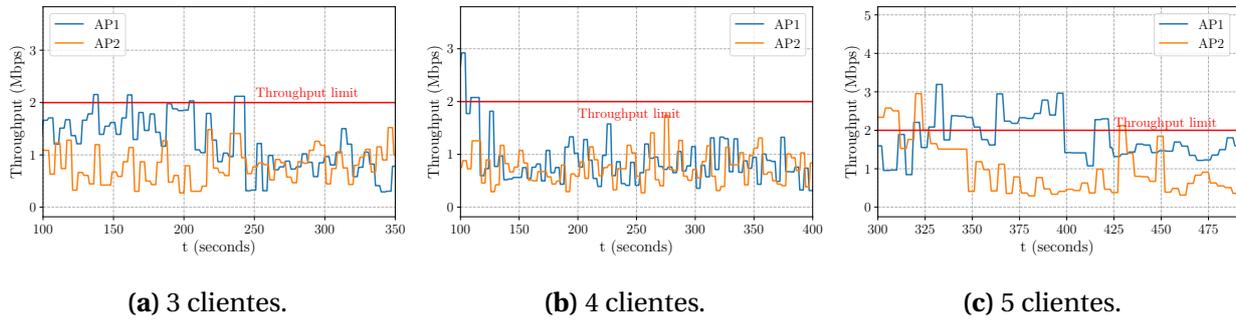


Figura 5.9: Resultados OM con 3, 4 y 5 clientes.

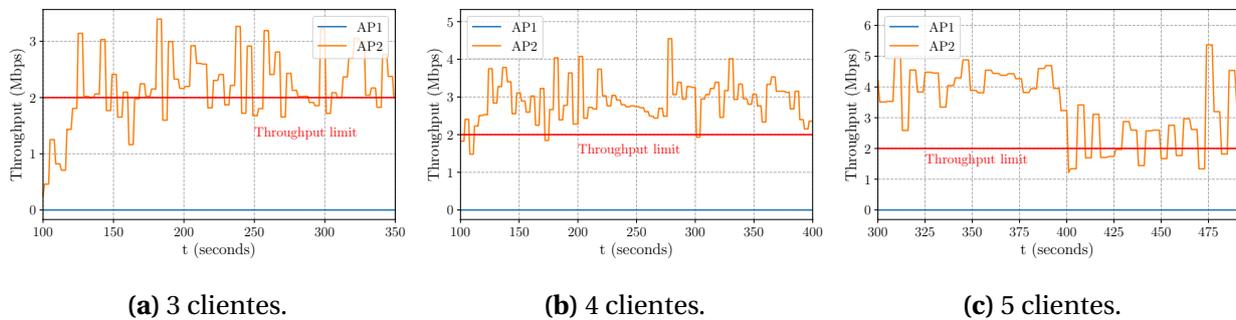


Figura 5.10: Resultados red tradicional con 3, 4 y 5 clientes.

En la Figura 5.9a, se ve como el controlador efectúa las transferencias de los clientes respecto a los resultados que arroja la solución del modelo de optimización, en este caso entre los 200 y 300 segundos se realiza la primera redistribución de la red. La solución factible retorna las direcciones MAC de cada uno de los puntos de acceso y de los clientes a asociarse. En este proceso el controlador espera el tiempo suficiente (5 segundos) para realizar la petición de una nueva distribución. Entre los 300 y 400 segundos, se aprecia un pico de rendimiento en el AP2 que supera el límite, pero debido a las consideraciones del controlador se espera hasta que este continúe o se estabilice, después de los 400 segundos los datos se estabilizan y no se realiza una nueva redistribución. En la red tradicional (Figura 5.10a) se ve que mantiene un consumo de rendimiento superior en un solo punto de acceso, el cual casi es de 3 Mbps.

En la Figura 5.9b, se observa la distribución que realiza la solución del modelo de optimización con 4 clientes conectados. En los primeros 100 segundos un punto de acceso (AP1) supera el límite, luego entre los 100 y 400 segundos se mantienen estadísticas similares entre los puntos de acceso, posteriormente estas suben pero se mantienen bajo el límite impuesto. En relación a la red tradicional (Figura 5.10b) se ve una clara mejora y control, a pesar de que

el modelo de optimización es una implementación que se ejecuta en paralelo al controlador 5G-EmPOWER.

En la Figura 5.9c, se ve que respecto a la red tradicional el controlador trata de acomodar las cargas tomando los datos dotados por el modelo de optimización, logrando que no se supere los 3 Mbps y que se establezca la carga de los 300 segundos en adelante; la red tradicional (Figura 5.10c) al no contar con las características de la red SDN sobrecarga un punto de acceso, llevándolo hasta las 5 Mbps, lo cual demuestra que el control de limite no esta funcionando adecuada mente o puede no estar habilitado.

Tabla 5.10: Rendimiento promedio comparando OM - 5G-EmPOWER con la red tradicional.

Ciudad	lb AP1	lb AP2	normal AP1	normal AP2
3	0.94 Mbps	0.51 Mbps	0.0 Mbps	2.15 Mbps
4	0.98 Mbps	0.75 Mbps	0.0 Mbps	2.89 Mbps
5	1.82 Mbps	1.01 Mbps	0.0 Mbps	3.86 Mbps

Los resultados en la Tabla 5.10, demuestran que los puntos de acceso presentan mejores condiciones de carga con 4 clientes y que el algoritmo 6, permite tomar mejores condiciones a la red, en comparación a los datos arrojados en la red tradicional. Los datos para 3, 4 y 5 clientes muestran que resolver una distribución en paralelo al controlador es tan eficiente como la aplicación de la decisión efectuada por otros algoritmos.

5.2. Evaluación de la calidad de vídeo en la red utilizando los algoritmos de balanceo de carga implementados

Debido a que el controlador tiene mejores efectos en la red, con las características de calidad de servicio (QoS) que 5G-EmPOWER ofrece, se tienen transmisiones de vídeo más confiables. Para determinar la calidad de servicio se evaluó la calidad del vídeo recibido en cada uno de los clientes asociados a la red, utilizando el PSNR.

En la Figura 5.11, se comparan los resultados de la evaluación de los vídeos capturados para cada uno de los escenarios y de los algoritmos de balanceo de carga. El vídeo al transmitirlo en una red balanceada, con los algoritmos implementados, supera en calidad del vídeo transmitido en una red tradicional.

Según la Tabla 5.11, los escenarios con mejor calidad son Best-Fit y el Modelo de Optimización como balanceadores de carga.

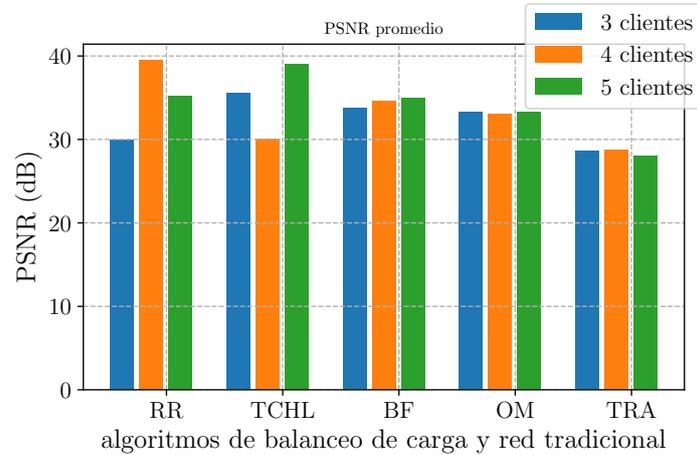


Figura 5.11: Resultados del PSNR promedio.

Tabla 5.11: PSNR promedio (dB).

Clientes	RR	TCHL	BF	OM	TRA
3	29.93	35.55	33.78	33.27	28.63
4	39.45	30.06	34.59	33.06	28.70
5	35.19	39.04	34.94	33.24	28.01

Tabla 5.12: Porcentaje de aproximación.

Clientes	RR	TCHL	BF	OM	TRA
3	59.86%	71.1%	67.56%	66.54%	57.26%
4	78.9%	60.12%	69.18%	66.12%	57.4%
5	70.38%	78.08%	69.88%	66.48%	56.02%

En la Tabla 5.12, podemos detallar que con 3 clientes el mejor resultado fue al utilizar el algoritmo TCHL, el cual tiene un valor del 71.1%. Con 4 clientes el mejor resultado fue usando el algoritmo RR, el cual tiene un valor del 78.9%. Con 5 clientes el mejor resultado fue utilizando el algoritmo TCHL, el cual tiene un valor del 78.08%. Pero los datos son mas estables en los porcentajes correspondientes a los algoritmos BF y OM, lo cual quiere decir

que el vídeo tuvo calidad similar para las diferentes cantidades de clientes. En relación a la red tradicional, el vídeo fue de mayor porcentaje de calidad, al usar los algoritmos de balanceo de carga.

6

Conclusiones

En este trabajo, se implementaron esquemas de equilibrio de carga a través de la administración de asociaciones en redes SDN inalámbricas. Las implementaciones supervisan el rendimiento de la red, utilizando técnicas como RR, TCHL, BF, la solución del modelo de optimización BPP y el proceso de transferencia sin modificaciones en el cliente. Estas distribuciones consideran una visión global de la red para lograr el objetivo del balanceo de carga.

Los esquemas de balanceo de carga implementados en la red definida por software, presentan mejores métricas de rendimiento y calidad de vídeo. En la red tradicional cuando un cliente se desconecta, el vídeo capturado se pierde a pesar de la reconexión inmediata, pero con la red SDN, el vídeo solo presentó un salto durante el periodo en que se produjo la reconexión.

De igual forma, SDN para redes inalámbricas permitió administrar la red de forma escalable y centralizada, otorgando un control sobre cualquier enrutador o punto de acceso que use el protocolo de comunicación OpenFlow. Por lo tanto, el uso de OpenFlow resuelve la interoperabilidad al trabajar con dispositivos de diferentes fabricantes y un firmware como OpenWrt hace posible este tipo de administraciones.

Comparado con el estado del arte para las implementaciones de balanceo de carga en redes inalámbricas con SDN, se rescata que a diferencia de lo disponible en la literatura, la implementación en este proyecto hizo uso de la tecnología ofrecida por OpenWrt y Open vSwitch, para desplegar una implementación propia con dispositivos físicos.

De igual manera, se resalta que las soluciones de equilibrio de carga propuestas son aplica-

bles a cualquier dispositivo que admita el estándar OpenFlow. Para redes inalámbricas, el enrutador debe ser compatible con OpenWrt y el controlador 5G-EmPOWER para establecer un BSSID único para cada LVAP.

El primer algoritmo, implementado en POX, equilibra la carga hasta el límite establecido, permitiendo el acceso de usuarios bloqueados cuando hay capacidad disponible. En los algoritmos implementados en 5G-EmPOWER, el controlador de red equilibra el rendimiento de los AP, transfiriendo sin desconexión los clientes a los AP descargados y utilizando la abstracción de LVAP.

En cuanto a desempeño, los mejores resultados se obtuvieron al utilizar el modelo de optimización y BF, ya que al evaluar el PSNR, se evidencian resultados similares para las pruebas con 3, 4 y 5 clientes, como se puede apreciar en la Tabla 5.12.

En este proyecto, los experimentos realizados, aun siendo en laboratorio y con una cantidad limitada de clientes, permiten ver la flexibilidad que los algoritmos de balanceo de carga ofrecen y su impacto en la administración de los recursos. Por tanto, este proceso es el primer paso para implementaciones con redes más grandes.

Como trabajo futuro, se puede optimizar y escalar lo que ya se ha implementado, desarrollando una decisión de límite que se establezca para equilibrar la carga en forma dinámica y haciendo esta decisión similar a un esquema Cell Breathing. De igual manera, se pueden explorar otros mecanismos de control, basados por ejemplo en algoritmos genéticos o técnicas de inteligencia artificial.

Bibliografía

- [1] M. K. Alam, S. A. Latif, M. H. Masud, M. Akter, F. Anwar y J. S. Yalli, «An analysis of scheduling scheme for QoS guaranteed interactive multimedia over high speed wireless campus networks», *Proceedings - 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, AIMS 2013*, págs. 421-427, 2014. DOI: 10.1109/AIMS.2013.77. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6959955>.
- [2] F. Li, J. Chung, M. Li, H. Wu, M. Claypool y R. Kinicki, «Application, network and link layer measurements of streaming video over a wireless campus network», en *Proceedings of the 6th International Conference on Passive and Active Network Measurement*, ép. PAM'05, Boston, MA: Springer-Verlag, 2005, págs. 189-202, ISBN: 3-540-25520-6, 978-3-540-25520-8. DOI: 10.1007/978-3-540-31966-5_15. dirección: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-31966-5%5C_15.
- [3] H. Moura, G. V. C. Bessa, M. A. M. Vieira y D. F. Macedo, «Ethanol: Software defined networking for 802.11 Wireless Networks», *Proceedings of the 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management, IM 2015*, págs. 388-396, 2015. DOI: 10.1109/INM.2015.7140315. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7140315>.
- [4] I. Publication, «The modeling and simulation of wireless campus network», *International Journal of Computer Science and Information Security IJCSIS*, vol. 9, n.º 6, pág. 355, 2017, ISSN: 1947-5500. dirección: <http://sites.google.com/site/ijcsis/>.
- [5] Cisco, *Cisco visual networking index*, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>, Accessed: 2018-08-28.
- [6] S. Y. Hu, S. C. Zhang y D. Z. Qin, «The design and application of wireless network based on digital campus», en *Advanced Research in Material Engineering, Machinery and Applied Technologies*, ép. Advanced Materials Research, vol. 1078, Trans Tech

- Publications, feb. de 2015, págs. 337-340. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1078.337.
- [7] Y. C. Kao, Y. C. Chang y R. S. Chang, «Managing bring your own device services in campus wireless networks», *ICSEC 2015 - 19th International Computer Science and Engineering Conference: Hybrid Cloud Computing: A New Approach for Big Data Era*, 2016. DOI: 10.1109/ICSEC.2015.7401456. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7401456>.
- [8] IEEE Computer Society, «Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Am,» IEEE Std 802.11s-2011 (Amendment to IEE», *IEEE Standard*, vol. 2013, 2013. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6587721>.
- [9] K. A. Magade y A. Patankar, «Techniques for load balancing in Wireless LAN's», en *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2014 - Proceedings*, 2014, págs. 1831-1836, ISBN: 9781479933587. DOI: 10.1109/ICCSP.2014.6950162.
- [10] L.-H. Yen, T.-T. Yeh y K.-H. Chi, «Load Balancing in IEEE 802.11 Networks», *IEEE Internet Computing*, vol. 13, n.º 1, págs. 56-64, 2009, ISSN: 1089-7801. DOI: 10.1109/mic.2009.11.
- [11] O. Brickley, S. Rea y D. Pesch, «Load balancing for qos enhancement in ieee802.11e wlans using cell breathing techniques», en *7th IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Maroc*, 2005.
- [12] Y. Bejerano, S. J. Han y L. Li, «Fairness and load balancing in wireless LANs using association control», *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, n.º 3, págs. 560-573, 2007, ISSN: 10636692. DOI: 10.1109/TNET.2007.893680.
- [13] T. Scully y K. N. Brown, «Wireless LAN load-balancing with genetic algorithms», en *Applications and Innovations in Intelligent Systems XVI - Proceedings of AI 2008, the 28th SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence*, 2009, págs. 3-16, ISBN: 9781848822146. DOI: 10.1007/978-1-84882-215-3-1.

- [14] C. Y. Lin, W. P. Tsai, M. H. Tsai e Y. Z. Cai, «Adaptive load-balancing scheme through wireless sdn-based association control», en *Proceedings - International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA*, 2017, ISBN: 9781509060283. DOI: 10.1109/AINA.2017.16.
- [15] Y. D. Lin, C. C. Wang, Y. J. Lu, Y. C. Lai y H. C. Yang, «Two-tier dynamic load balancing in SDN-enabled Wi-Fi networks», *Wireless Networks*, vol. 24, n.º 8, págs. 2811-2823, 2018, ISSN: 15728196. DOI: 10.1007/s11276-017-1504-3.
- [16] R. Merz, T. Vazao, J. Schulz-Zander, L. Suresh y A. Feldmann, «Towards programmable enterprise WLANS with Odin», 2012, pág. 115, ISBN: 978-1-4503-1477-0. DOI: 10.1145/2342441.2342465.
- [17] R. Riggio, M. K. Marina, J. Schulz-Zander, S. Kuklinski y T. Rasheed, «Programming Abstractions for Software-Defined Wireless Networks», *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 12, n.º 2, págs. 146-162, 2015, ISSN: 19324537. DOI: 10.1109/TNSM.2015.2417772. arXiv: 1411.2852v1.
- [18] H. Velayos, V. Aleo y G. Karlsson, «Load balancing in overlapping wireless LAN cells», 3833-3836 Vol.7, 2004. DOI: 10.1109/icc.2004.1313270. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1313270>.
- [19] D. Kreutz, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, S. Uhlig, P. Verissimo y F. Ramos, «Software-Defined Networking : A Comprehensive Survey», *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n.º 1, págs. 14-76, 2015, ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999. arXiv: 1406.0440. dirección: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6994333>.
- [20] W. K. Soo, T.-C. Ling, A. H. Maw y S. T. Win, «Survey on Load-Balancing Methods in 802.11 Infrastructure Mode Wireless Networks for Improving Quality of Service», *ACM Computing Surveys*, vol. 51, n.º 2, págs. 1-21, 2018, ISSN: 03600300. DOI: 10.1145/3172868.
- [21] K.-L. Alvin Yau, A. Malik, U. Ullah, J. Qadir y B. Ahmad, «QoS in IEEE 802.11-based wireless networks: A contemporary review», *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 55, págs. 24-46, 2015, ISSN: 10848045. DOI: 10.1016/j.jnca.2015.04.016. dirección: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1084804515000892>.
- [22] I. Paudel, «QoS provisioning in future wireless local area networks», Theses, Institut National des Télécommunications, ene. de 2015. dirección: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01217195>.

- [23] Y. Fang y W. Ma, «Wireless communications systems and networks», en, M. Guizani, ed., New York, NY, USA: Plenum Press, 2004, cap. Mobility Management for Wireless Networks: Modeling and Analysis, págs. 473-512, ISBN: 0-306-48190-1. dirección: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1016648.1016665>.
- [24] A. Dutta y H. Schulzrinne, «Mobility Protocols and Handover Optimization», *Mobility Protocols and Handover Optimization*, 2014. DOI: 10.1002/9781119945505.
- [25] M. Collotta, «FLBA: A fuzzy algorithm for load balancing in IEEE 802.11 networks», *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 53, págs. 183-192, 2015, ISSN: 10958592. DOI: 10.1016/j.jnca.2015.04.005. dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2015.04.005>.
- [26] H. Zhang y X. Guo, «SDN-based load balancing strategy for server cluster», en *CCIS 2014 - Proceedings of 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems*, 2014, págs. 662-667, ISBN: 9781479947201. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175817.
- [27] H. Zhong, Y. Fang y J. Cui, «LBBSRT: An efficient SDN load balancing scheme based on server response time», *Future Generation Computer Systems*, vol. 68, págs. 183-190, 2017, ISSN: 0167739X. DOI: 10.1016/j.future.2016.10.001. dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.10.001>.
- [28] H. Zhong, Q. Lin, J. Cui, R. Shi y L. Liu, «An Efficient SDN Load Balancing Scheme Based on Variance Analysis for Massive Mobile Users», *Mobile Information Systems*, vol. 2015, 2015, ISSN: 1875905X. DOI: 10.1155/2015/241732.
- [29] K. A. Magade y A. Patankar, «Techniques for load balancing in Wireless LAN's», *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2014 - Proceedings*, págs. 1831-1836, 2014. DOI: 10.1109/ICCSP.2014.6950162. dirección: [Techniques%20for%20load%20balancing%20in%20Wireless%20LAN's](http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2014.6950162).
- [30] Y.-f. Wen y J.-c. Shen, «Computers and electrical engineering», *Computers & Electrical Engineering*, vol. 21, n.º 1, pág. I, 1995, ISSN: 00457906. DOI: 10.1016/0045-7906(95)90001-2.
- [31] T. Lei, X. Wen, Z. Lu e Y. Li, «A Semi-Matching Based Load Balancing Scheme for Dense IEEE 802.11 WLANs», *IEEE Access*, vol. 5, págs. 15332-15339, 2017, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2733083. dirección: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7995049/>.

- [32] C.-S. Li y W. Liao, «Software defined networks [Guest Editorial]», *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n.º 2, págs. 113-113, 2013, ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/mcom.2013.6461194. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6461194>.
- [33] A. Drescher, «A Survey of Software-Defined Wireless Networks», *Washington University in St. Louis*, págs. 1-15, 2014. dirección: <http://www.cse.wustl.edu/~%7B%7Djain/cse574-14/ftp/sdnw/index.html>.
- [34] C. Chaudet e Y. Haddad, «Wireless software defined networks: Challenges and opportunities», *2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2013*, 2013. DOI: 10.1109/COMCAS.2013.6685237. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6685237>.
- [35] S. Manzoor, X. Hei y W. Cheng, «A Multi-controller Load Balancing Strategy for Software Defined WiFi Networks», en *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11066 LNCS, 2018, págs. 622-633, ISBN: 9783030000141. DOI: 10.1007/978-3-030-00015-8_54.
- [36] Y. Zhou, M. Zhu, L. Xiao, L. Ruan, W. Duan, D. Li, R. Liu y M. Zhu, «A load balancing strategy of SDN controller based on distributed decision», en *Proceedings - 2014 IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, TrustCom 2014*, 2015, págs. 851-856, ISBN: 9781479965137. DOI: 10.1109/TrustCom.2014.112.
- [37] H. E. Egilmez, S. Civanlar y A. M. Tekalp, «An optimization framework for QoS-enabled adaptive video streaming over openflow networks», *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 15, n.º 3, págs. 710-715, 2013, ISSN: 15209210. DOI: 10.1109/TMM.2012.2232645. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6376227>.
- [38] H. E. Egilmez y A. M. Tekalp, «Distributed QoS architectures for multimedia streaming over software defined networks», *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 16, n.º 6, págs. 1597-1609, 2014, ISSN: 15209210. DOI: 10.1109/TMM.2014.2325791. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6819050>.
- [39] N. Kiran, Y. Changchuan y Z. Akram, «AP load balance based handover in software defined WiFi systems», en *Proceedings of 2016 5th International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, IEEE IC-NIDC 2016*, 2017, ISBN: 9781509012459. DOI: 10.1109/ICNIDC.2016.7974526.

- [40] E. Coronado, J. Villalon y A. Garrido, «Wi-balance: SDN-based load-balancing in enterprise WLANs», en *2017 IEEE Conference on Network Softwarization: Softwarization Sustaining a Hyper-Connected World: En Route to 5G, NetSoft 2017*, 2017, ISBN: 9781509060085. DOI: 10.1109/NETSOFT.2017.8004257.
- [41] P. Kaur, J. K. Chahal y A. Bhandari, «Load Balancing in Software Defined Networking: A Review», *inf. téc.* 1, 2018, págs. 1-5. DOI: 1444-8939.2018/5-1/MRR.33. dirección: www.trp.org.in.
- [42] D. Mithbavkar, H. Joshi, H. Kotak, D. Gajjar y L. Perigo, «Round Robin Load Balancer using Software Defined Networking (SDN)», *Capstone Team Research Project*, págs. 1-9, 2016.
- [43] A. J. Nathan y A. Scobell, *Wireless Network Design Optimization Models and Solution Procedures*, 5. 2012, vol. 91, págs. 1689-1699, ISBN: 9788578110796. DOI: 10.1017/CB09781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [44] «Combinatorial optimization problems», en *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007, cap. 2, págs. 53-96, ISBN: 9780470172261. DOI: 10.1002/9780470172261.ch2. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470172261.ch2>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470172261.ch2>.
- [45] G. Scheithauer, *Introduction to Cutting and Packing Optimization*, ép. International Series in Operations Research and Management Science 978-3-319-64403-5. Springer, jul. de 2018, ISBN: ARRAY(0x41b78400). DOI: 10.1007/978-3-319-64403-5. dirección: <https://ideas.repec.org/b/spr/isorms/978-3-319-64403-5.html>.
- [46] S. Kamali, «Efficient bin packing algorithms for resource provisioning in the cloud», *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9511, págs. 84-98, 2016, ISSN: 16113349. DOI: 10.1007/978-3-319-29919-8_7.
- [47] D. Castro-Silva y E. Gourdin, «A study on load-balanced variants of the bin packing problem», *Discrete Applied Mathematics*, n.º November, 2018, ISSN: 0166218X. DOI: 10.1016/j.dam.2018.07.010. arXiv: arXiv:1810.12086v1.
- [48] M. Qilin y S. Weikang, «A Load Balancing Method Based on SDN», *Proceedings - 2015 7th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2015*, págs. 18-21, 2015. DOI: 10.1109/ICMTMA.2015.13.

- [49] *Bin packing and cutting stock problems*, <https://scipbook.readthedocs.io/en/latest/bpp.html>, Accessed: 2018-08-28.
- [50] F. Brand y P. Pedroso, «Solving Bin Packing Related Problems Using an Arc Flow Formulation Technical Report Series : DCC-2012-03», 2012. dirección: http://www.optimization-online.org/DB%7B%5C_%7DFILE/2012/04/3433.pdf.
- [51] F. Furini y X. Shen, «Matheuristics for the temporal bin packing problem», en *Recent Developments in Metaheuristics*, L. Amodeo, E.-G. Talbi y F. Yalaoui, eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, págs. 333-345, ISBN: 978-3-319-58253-5. DOI: 10.1007/978-3-319-58253-5_19. dirección: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58253-5_19.
- [52] F. Brandão, «Bin packing and related problems - pattern-based approaches», 2012.
- [53] ONF, *Open networking foundation*, <https://www.opennetworking.org/>, Accessed: 2018-02-28.
- [54] POX, *The pox network software platform*, <https://github.com/noxrepo/pox>, Accessed: 2018-02-28.
- [55] S. N. K. Estefania Coronado y R. Riggio, *5g-empower*, <https://5g-empower.io/>, Accessed: 2018-02-28.
- [56] G. Optimization, *Gurobi optimization*, <http://www.gurobi.com>, Accessed: 2018-08-28.
- [57] O. project, *Openwrt project*, <https://openwrt.org/>, Accessed: 2018-02-28.
- [58] E. / . L. B. N. Laboratory, *Iperf - the ultimate speed test tool for tcp, udp and sctp*, <https://iperf.fr/>, Accessed: 2018-02-28.
- [59] B. Pfaff, J. Pettit, T. Koponen, E. J. Jackson, A. Zhou, J. Rajahalme, J. Gross, A. Wang, J. Stringer, P. Shelar y col., «The design and implementation of open vswitch.», en *NSDI*, 2015, págs. 117-130.
- [60] K. Koutlia, A. Umbert, R. Riggio, I. Vila y F. Casadevall, «A new RAN slicing strategy for multi-tenancy support in a WLAN scenario», *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops, NetSoft 2018*, págs. 242-246, 2018. DOI: 10.1109/NETSOFT.2018.8460138.
- [61] O. Project, *Openwrt for tp-link archer c7 ac1750 v2*, https://openwrt.org/toh/hwdata/tp-link/tp-link_archer_c7_ac1750_v2.0, Accessed: 2018-02-28.

- [62] R. S. José Joskowicz, «Modelo de Estimación de Calidad de Video : Video Quality Experts Groups Video Quality Experts Groups», vol. 10, n.º c, págs. 7-17, 2012.
- [63] H. Näkne y H. Näkne, *Video Quality Metric improvement using motion and spatial masking spatial masking*. 2016.
- [64] O. .-. team, *Ai courses by opencv*, <https://opencv.org>, Accessed: 2019-08-28.