

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ARQUITECTURA SDN SOBRE FREEBSD CON WIFI 6E Y 5G PARA EL DESAFÍO DE LA ÚLTIMA MILLA EN ÁREAS DE ALTA DENSIDAD DE USUARIOS

**SOFTWARE-DEFINED NETWORKING ARCHITECTURE ON
FREEBSD WITH WIFI 6E AND 5G FOR THE LAST-MILE
CHALLENGE IN HIGH-DENSITY USER AREAS**

Arturo Lezama Ojeda

Universidad de Guadalajara, México

José Antonio Orizaga Trejo

Universidad de Guadalajara, México

Tonatiuh Guadalupe Nava Razon

Universidad de Guadalajara, México

Arquitectura SDN sobre FreeBSD con WiFi 6E y 5G para el desafío de la última milla en áreas de alta densidad de usuarios

Arturo Lezama Ojeda¹

arturo.lezama1002@alumnos.udg.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0996-8926>

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

José Antonio Orizaga Trejo

jose.orizaga@academicos.udg.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5649-5514>

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

Tonatiuh Guadalupe Nava Razon

tonatiuh.nava@alumnos.udg.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1115-0744>

Universidad de Guadalajara
Guadalajara, Jalisco, México

RESUMEN

En este artículo se propone y analiza una arquitectura innovadora basada en redes definidas por software (SDN) implementadas sobre FreeBSD, que integra tecnologías de comunicación de última generación como WiFi 6E y 5G móvil. La problemática de la última milla en entornos de alta densidad de usuarios representa un desafío significativo en el diseño de infraestructuras de redes de telecomunicaciones, debido a la creciente demanda de conectividad, la saturación del espectro radioeléctrico y la necesidad de garantizar baja latencia y alta confiabilidad en la transmisión de datos. La implementación de SDN permite la configuración y gestión dinámica de los recursos de red, optimizando su desempeño y permitiendo una asignación eficiente del ancho de banda disponible. En este trabajo se detalla la metodología de diseño e implementación de esta arquitectura, evaluando su viabilidad mediante pruebas de rendimiento en entornos controlados y en escenarios de despliegue real. Los resultados obtenidos demuestran mejoras sustanciales en la capacidad de respuesta de la red, la mitigación de interferencias y la gestión eficiente de la infraestructura de última milla, lo que evidencia la relevancia y aplicabilidad de la solución propuesta para optimizar la conectividad en zonas de alta demanda de servicio.

Palabras clave: SDN, FreeBSD, WiFi 6E, 5G, última milla

¹ Autor principal.

Correspondencia: arturo.lezama1002@alumnos.udg.mx

Software-defined networking architecture on FreeBSD with WiFi 6E and 5G for the last-mile challenge in high-density user areas

ABSTRACT

Access to high-speed internet is essential in daily life, impacting work, education, entertainment, and communication. However, in remote or low-population-density areas, providing quality services remains This article proposes and analyzes an innovative architecture based on software-defined networking (SDN) implemented on FreeBSD, integrating next-generation communication technologies such as WiFi 6E and mobile 5G. The last-mile problem in high-density user environments represents a significant challenge in the design of telecommunications network infrastructures due to the growing demand for connectivity, spectrum saturation, and the need to ensure low latency and high reliability in data transmission. The implementation of SDN allows for dynamic configuration and management of network resources, optimizing performance and enabling efficient allocation of available bandwidth. This work details the design and implementation methodology of this architecture, evaluating its feasibility through performance tests in controlled environments and real deployment scenarios. The results obtained demonstrate substantial improvements in network responsiveness, interference mitigation, and efficient management of last-mile infrastructure, highlighting the relevance and applicability of the proposed solution to optimize connectivity in high-demand service areas.

Keywords: SDN, FreeBSD, WiFi 6E, 5G, last mile

Artículo recibido 15 febrero 2025

Aceptado para publicación: 18 marzo 2025



INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la demanda de conectividad en entornos urbanos y suburbanos ha puesto a prueba las infraestructuras de telecomunicaciones, especialmente en lo que respecta a la provisión eficiente de servicios en la última milla. Las redes de acceso enfrentan diversos desafíos, como la saturación del espectro radioeléctrico, la latencia elevada y la necesidad de gestionar de manera eficiente los recursos de red en zonas de alta densidad de usuarios. La proliferación de dispositivos inteligentes y aplicaciones que requieren comunicación inalámbrica y gran ancho de banda ha generado una presión sin precedentes sobre las redes existentes, lo que exige el desarrollo de soluciones innovadoras que permitan mejorar la calidad del servicio y garantizar una conectividad robusta y estable. En este contexto, el paradigma de redes definidas por software (SDN) ha emergido como una alternativa prometedora, permitiendo la programabilidad, flexibilidad y optimización dinámica de las infraestructuras de telecomunicaciones. A través de un control centralizado, SDN facilita la gestión eficiente de los recursos de red, reduciendo la latencia y mejorando la asignación del ancho de banda en entornos con alta demanda de conectividad.

Por su parte FreeBSD, un sistema operativo de alto rendimiento ampliamente utilizado en entornos de redes y telecomunicaciones, ofrece una plataforma estable y altamente configurable para la implementación de soluciones SDN. Su compatibilidad con tecnologías Wifi de alta velocidad como AC y 4G móvil estaba desatendida en el pasado lustro, sin embargo desde un par de años atrás el equipo oficial de FreeBSD ha ido anunciando esfuerzos acelerados para implementar nuevas tecnologías de Wifi y redes móviles dándolo a conocer en su documentación de Hardware soportado y por parte de su fundación. Por lo que conviene iniciar el camino de aprovechar todo su potencial en redes de alto flujo de datos, su seguridad y robustez para iniciar innovaciones en SDD enfocadas al futuro del hardware de WiFi 6E y 5G móvil que lo convertiría en una opción ideal para desarrollar arquitecturas de última milla que busquen maximizar el rendimiento y la eficiencia en entornos de alta demanda. La combinación de estas tecnologías permite no solo incrementar la capacidad de transmisión de datos, sino también mejorar la adaptabilidad de la red ante variaciones en el tráfico y las condiciones del espectro radioeléctrico. El presente trabajo analiza la implementación de una arquitectura SDN sobre FreeBSD con soporte para WiFi 6E y 5G, evaluando las tecnologías actuales y



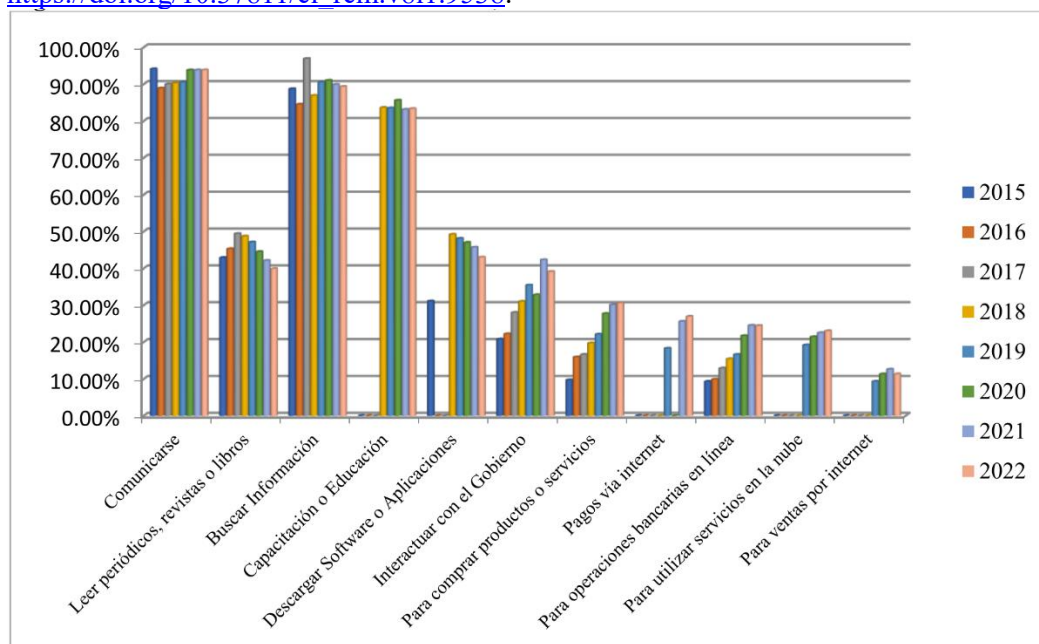
la investigación científica desarrollada hasta el momento, contribuyendo a la evolución del diseño de las telecomunicaciones en entornos de alta densidad de usuarios áreas con saturación de usuarios.

Desafíos de las redes inalámbricas de alta velocidad ante la saturación de usuarios y el incremento exponencial en la transferencia de datos

Las redes inalámbricas de alta velocidad enfrentan desafíos críticos debido al crecimiento exponencial de usuarios conectados y el aumento del volumen de transferencia de datos. En entornos urbanos y de alta densidad, la saturación del espectro radioeléctrico limita el rendimiento, afectando la calidad del servicio en aplicaciones que requieren alta estabilidad, como el streaming en 4K, el gaming en línea y las videoconferencias. La proliferación de dispositivos y la demanda intensiva de ancho de banda generan congestión, provocando caídas en la velocidad de transmisión, interferencias y pérdidas de paquetes. A pesar de los avances en tecnologías como WiFi 6E y 5G, la eficiencia de las redes sigue viéndose comprometida por la falta de mecanismos optimizados de gestión del tráfico y la asignación dinámica del espectro disponible. En zonas rurales y apartadas, donde los proveedores de servicio de internet inalámbrico (WISP) juegan un papel fundamental en la conectividad, los desafíos son aún mayores. A diferencia de las redes urbanas, donde la infraestructura de fibra óptica es más accesible, los (ISPs) WISP dependen principalmente de enlaces inalámbricos de largo alcance para distribuir la señal a comunidades con acceso limitado a internet. Y la saturación de clientes en un solo punto de acceso regional genera degradación en la experiencia del usuario, especialmente en horas pico, cuando múltiples dispositivos compiten por recursos limitados.



Fig-01 Principal uso de Internet. *Fuente:* Lezama Ojeda, A., & Orizaga Trejo, J. A. (2024). *Superando el Desafío de la Última Milla y la Brecha Digital: Perspectivas para México en el Horizonte 2030*. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(1), 1433-1457. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9538.



En la Fig-01 se muestra el crecimiento sostenido en la comunicación digital, la educación en línea y las operaciones con alto consumo de datos, como transacciones bancarias y comercio electrónico, evidencia una creciente demanda de conectividad en tiempo real y alto volumen de transferencia de datos. Este fenómeno resalta la necesidad urgente de modernizar las redes inalámbricas, cuya capacidad actual podría volverse insuficiente. Además, se prevé que la mayoría de las comunicaciones sucedan en dispositivos móviles por lo que la adopción y mejora de redes inalámbricas es crucial para garantizar estabilidad, baja latencia y eficiencia en la gestión del tráfico digital, evitando la congestión y asegurando la sostenibilidad de los ecosistemas digitales emergentes.

Otro problema significativo es la escalabilidad de las infraestructuras WISP en regiones de baja densidad de población. Debido a la distancia entre clientes y la necesidad de redes de malla o repetidores para extender la cobertura, la latencia aumenta considerablemente, lo que impacta negativamente en aplicaciones en tiempo real. Además, la calidad del servicio se ve afectada por factores ambientales como el clima, la orografía del terreno y la presencia de obstáculos naturales. Para abordar estos problemas, es fundamental la implementación de soluciones basadas en redes definidas por software (SDN) y la optimización dinámica de los recursos de red. La adopción de arquitecturas híbridas que combinen tecnologías como FreeBSD, WiFi 6E y 5G, junto con

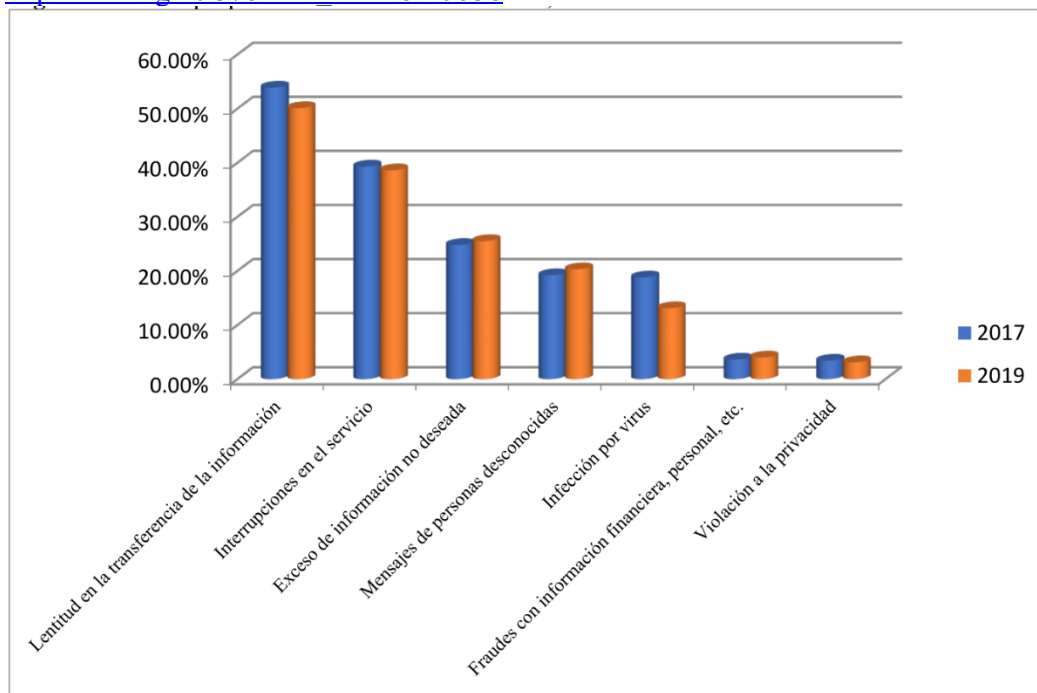
mecanismos avanzados de gestión de tráfico, permitiría mitigar la congestión y mejorar la eficiencia en la distribución de ancho de banda. Asimismo, el uso de estrategias como la segmentación de redes, la priorización de tráfico y la automatización en la asignación de espectro contribuiría a una conectividad más estable tanto en entornos urbanos como en zonas rurales, asegurando una mejor experiencia de usuario en escenarios de alta saturación de clientes.

Tipos de Requerimientos de las redes de alta velocidad para la sostenibilidad de la conectividad móvil en ciudades inteligentes hacia el año 2030

Las redes de alta velocidad representan un componente esencial en la evolución de las ciudades inteligentes, donde la hiperconectividad y la automatización avanzada impulsan una transformación digital sin precedentes. A medida que los entornos urbanos se orientan hacia modelos de gestión basados en datos en tiempo real, la infraestructura de telecomunicaciones enfrenta el reto de soportar una demanda creciente de conectividad móvil. Se estima que para el año 2030, el tráfico de datos móviles experimentará un crecimiento exponencial debido a la proliferación de dispositivos interconectados en el marco del Internet de las Cosas IoT, la expansión de la inteligencia artificial aplicada a la gestión urbana, la implementación masiva de sistemas de video vigilancia en alta definición, el despliegue de vehículos autónomos y la consolidación de tecnologías emergentes como la realidad aumentada. En este contexto, las redes inalámbricas de alta velocidad deben evolucionar hacia arquitecturas más flexibles y escalables que permitan gestionar de manera eficiente la asignación de recursos en entornos con alta densidad de usuarios y flujos de datos variables. Para lograrlo, no basta con la adopción de una única tecnología, sino que es fundamental la combinación de distintas soluciones que permitan maximizar el rendimiento y la adaptabilidad de las infraestructuras de telecomunicaciones.



Fig-02 Problemas en la infraestructura de Internet. *Fuente:* Lezama Ojeda, A., & Orizaga Trejo, J. A. (2024). *Superando el Desafío de la Última Milla y la Brecha Digital: Perspectivas para México en el Horizonte 2030*. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(1), 1433-1457. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9538.



La Fig-02 nos muestra que, aunque se afirma políticamente que el acceso a Internet es universal, los datos demuestran que la infraestructura sigue siendo deficiente, especialmente por la lentitud en la transferencia de información y las interrupciones en el servicio. Estos problemas reflejan una brecha tecnológica que impide una conectividad eficiente. Para el futuro, es esencial modernizar las redes con en su totalidad, garantizando mayor estabilidad, menor latencia y un ancho de banda óptimo para la creciente demanda de datos.

En este sentido, la integración de redes definidas por software SDN y tecnologías de virtualización de funciones de red NFV se presenta como una solución viable para optimizar la gestión del tráfico y maximizar el aprovechamiento del espectro radioeléctrico. Asimismo, el uso de sistemas operativos altamente eficientes, como FreeBSD, proporciona una base estable y optimizada para la implementación de arquitecturas de red avanzadas, permitiendo un control preciso y una gestión eficiente de los recursos disponibles. La adopción de estándares de última generación, como WiFi 6E y 5G, es igualmente crucial para garantizar una conectividad robusta y adaptable a las fluctuaciones en la demanda de servicio, asegurando una baja latencia y un mayor rendimiento en la transmisión de datos. Además, la combinación de estas tecnologías, como la optimización mediante inteligencia

artificial y el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la asignación dinámica de ancho de banda, permitirá una mayor eficiencia operativa en entornos urbanos de alta densidad y en zonas rurales con acceso limitado a redes de fibra óptica. Como mencionan Lezama Ojeda y Orizaga Trejo (2024) El acceso a internet de alta velocidad es esencial en la vida diaria, impactando el trabajo, educación, entretenimiento y comunicación.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se realizó un análisis sistemático de la literatura científica relevante en torno a las arquitecturas SDN implementadas sobre FreeBSD y su integración con tecnologías emergentes como WiFi 6E y 5G. Se consultaron artículos científicos, conferencias y estudios de caso publicados en revistas de alto impacto, con el fin de identificar enfoques previos, metodologías utilizadas y resultados obtenidos en implementaciones similares. La revisión de la literatura permitió establecer una base teórica sólida y definir los criterios de comparación para la evaluación de las soluciones propuestas en cada estudio. Asimismo, se realizó un análisis comparativo los modelos de implementación SDN en entornos de alta densidad de usuarios, considerando, eficiencia espectral, calidad del servicio (QoS) y escalabilidad. Destacando las ventajas y limitaciones de cada enfoque en función de los requerimientos específicos de las redes de última milla. Finalmente, con base en la información recopilada, se elaboró una discusión crítica sobre las oportunidades y desafíos que representa la adopción de arquitecturas SDN sobre FreeBSD en entornos con alta demanda de conectividad, estableciendo recomendaciones para futuras investigaciones y despliegues experimentales.

Superioridad de FreeBSD en la gestión de tráfico de redes con alto volumen de datos y usuarios concurrentes

FreeBSD ha evolucionado como un sistema operativo robusto y altamente eficiente en la gestión del tráfico de red, destacándose sobre otras plataformas en entornos con un elevado volumen de datos y múltiples usuarios concurrentes, el soporte de FreeBSD para el Protocolo Común de Redundancia de Dirección (CARP) ofrece alta disponibilidad al permitir la configuración de direcciones IP redundantes en múltiples hosts, asegurando la continuidad del servicio en caso de fallos (Capítulo 34. Redes Avanzadas. s. f.). Su arquitectura modular y su enfoque en la estabilidad y rendimiento lo han



convertido en una opción preferida para servidores de alto desempeño, según Lezama Ojeda, A. (2020). A diferencia de algunas distribuciones Linux, FreeBSD permite mayor personalización sin necesidad de paquetes preconfigurados, optimizando el control del tráfico de red. Además existen distribuciones basadas en FreeBSD para ruteo incorporando redes definidas por software (SDN) y podría ser aprovechado por proveedores de servicios de Internet (ISP), se comprobó que FreeBSD es viable para su implementación en proveedores de internet WISP, ofreciendo mayor control y reducción de costos de infraestructura (Lezama Ojeda, A. 2020), y dispositivos embebidos de telecomunicaciones. A lo largo de su desarrollo, FreeBSD ha incorporado soporte para una variedad de arquitecturas de hardware, optimizando su compatibilidad con procesadores modernos y dispositivos especializados en redes de alto rendimiento. Uno de los avances más significativos en su evolución ha sido la incorporación del soporte para arquitecturas ARM (desde FreeBSD 10 en 2014) y RISC-V (desde FreeBSD 13 en 2021). Estas arquitecturas han permitido la expansión de FreeBSD en dispositivos de bajo consumo energético, como routers, sistemas IoT, gateways de telecomunicaciones y servidores embebidos, asegurando una gestión eficiente de redes inalámbricas en infraestructuras de telecomunicaciones con requisitos de alta disponibilidad, como menciona Lezama Ojeda, A. (2020).

002 *FreeBSD* ofrece toda la estabilidad y fiabilidad de un sistema Unix, permitiendo su uso como router, gateway o firewall con un alto nivel de compatibilidad con otros sistemas operativos. En particular, el uso de ARM en hardware de red ha facilitado la implementación de soluciones energéticamente eficientes en centros de datos y redes de distribución de contenido (CDN), mientras que RISC-V se ha consolidado como una opción prometedora para la computación embebida y sistemas de código abierto con alta seguridad y flexibilidad. FreeBSD Project. (2024). FreeBSD admite ARM de 64 bits (conocido como arm64 o AArch64) como una arquitectura de Nivel 1. Y la arquitectura RISC-V de 64 bits (riscv64) como una arquitectura de Nivel 2.

Otro aspecto clave en la evolución de FreeBSD es su creciente compatibilidad con chipsets WiFi de alta velocidad, lo que ha mejorado significativamente su rendimiento en la gestión de redes inalámbricas. En los últimos años, se ha ampliado el soporte para hardware de comunicación de última generación AC principalmente en chipset de Intel, iniciando el camino para seguir hacia plataformas WiFi 6, WiFi 6E y los desarrollos en WiFi 7 en futuras distribuciones. Además del soporte en redes



inalámbricas, FreeBSD ha incorporado compatibilidad con tarjetas de internet LTE, 3G y 4G. El controlador u3g proporciona compatibilidad con múltiples interfaces USB/PCCard expuestas por módems de fabricantes como Option, Vodafone, Qualcomm, Quectel, Huawei, Novatel y Sierra Wireless. Este soporte permite que los dispositivos se accedan como interfaces de red tradicionales, facilitando su integración en infraestructuras de telecomunicaciones. Modelos como el Sierra Wireless MC7430, un módulo LTE Cat 6, han sido utilizados exitosamente en FreeBSD para ofrecer velocidades de hasta 300 Mbps en descargas y 50 Mbps en cargas con bajo consumo energético, haciéndolo ideal para enrutadores y sistemas de conectividad industrial. Sin embargo, la compatibilidad con módems 5G aún no está implementada de forma nativa en el sistema por lo que inicialmente se necesitaría auxiliarse de componentes extras basados en Linux o implementar el desarrollo dentro del sistema FreeBSD con el soporte de binarios de Linux y otros Sistemas Operativos Potentes.

Preguntas Frecuentes para FreeBSD 11.X, 12.X, y 13.X. (s. f.). Compatibilidad binaria con muchos programas nativos de Linux, SCO, SVR4, BSDI y NetBSD.

Las Notas de Hardware de FreeBSD 14.0 antes de implementar este tipo de dispositivos en entornos de producción. La compatibilidad con tecnologías móviles es una de las áreas en evolución dentro del ecosistema de FreeBSD, lo que sugiere futuras mejoras en el soporte para redes celulares de alta velocidad. La combinación de estas mejoras tecnológicas ha consolidado a FreeBSD como un sistema operativo versátil, capaz de operar en hardware de alto rendimiento y en dispositivos embebidos de bajo consumo energético. Su flexibilidad, escalabilidad y compatibilidad con arquitecturas emergentes lo posicionan como una alternativa estratégica para la optimización de redes definidas por software, servicios de telecomunicaciones y soluciones de conectividad en ciudades inteligentes y redes rurales avanzadas.

Perspectivas del WiFi en la actualidad y futuro en redes de alta velocidad.

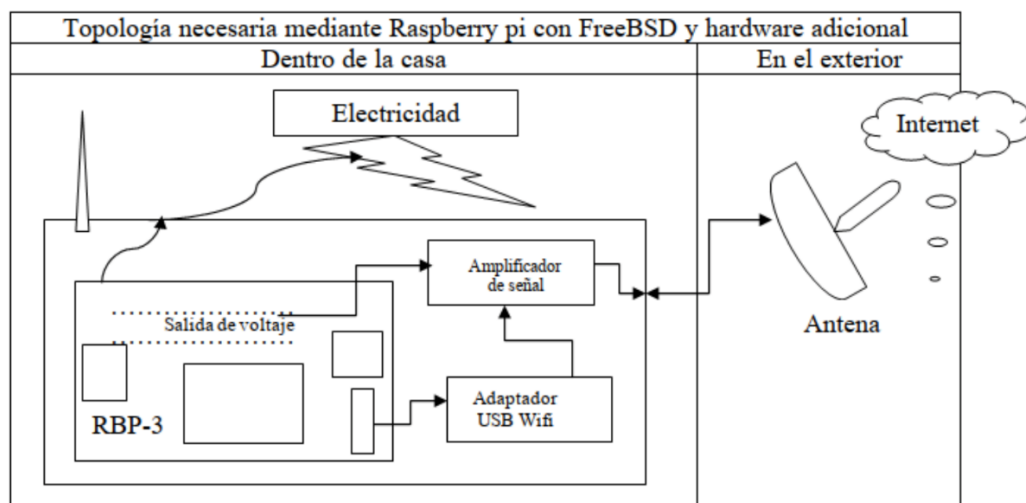
El WiFi ha evolucionado significativamente, consolidándose como una tecnología esencial en las redes de alta velocidad actuales y proyectándose como un pilar fundamental en las infraestructuras futuras y proporciona conectividad inalámbrica de alta velocidad, facilitando la movilidad y la flexibilidad en el acceso a la red. Su facilidad de instalación y la capacidad de conectar múltiples



dispositivos sin la necesidad de cableado físico representan ventajas significativas en términos de costos y conveniencia. Sin embargo, estas redes pueden enfrentar limitaciones en cuanto al ancho de banda y la velocidad de transferencia de datos, especialmente en entornos con alta densidad de usuarios, lo que puede afectar el rendimiento y la estabilidad de la conexión. El camino de su evolución apunta hacia estándares más avanzados, como WiFi 6 y WiFi 6E, que prometen mejoras en la eficiencia, capacidad y reducción de latencia. Estas tecnologías están diseñadas para manejar un mayor número de dispositivos simultáneamente, optimizando el rendimiento en entornos densamente poblados. Además, se anticipa una mayor integración con tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT), lo que permitirá una conectividad más robusta y eficiente en aplicaciones diversas, desde hogares inteligentes hasta sistemas industriales,). *Existen varias versiones de BSD adecuadas para arquitecturas ARM, incluso dentro de la rama FreeBSD existen varias distribuciones con soporte para drivers WiFi en todas las versiones* (Lezama Ojeda, A., 2020). Desde una perspectiva económica, el WiFi ofrece una reducción significativa en los costos asociados a la infraestructura física, al eliminar la necesidad de cableado extenso. Esta característica es especialmente beneficiosa en edificaciones donde la instalación de cables puede ser costosa o inviable. Sin embargo, las redes WiFi pueden ser susceptibles a interferencias y problemas de seguridad si no se implementan y gestionan adecuadamente. Además, la velocidad de transferencia puede verse afectada por factores ambientales y la cantidad de dispositivos conectados, lo que requiere una planificación y gestión cuidadosa para mantener un rendimiento óptimo.



Fig-02 Tomado de Router ARM AP+Cliente embebido, basado en FreeBSD para redes inalámbricas, por A. Lezama Ojeda, 2020, *Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara* (<https://hdl.handle.net/20.500.12104/96365>). Copyright 2020 por el autor.



En la Fig-003 se muestra el diagrama esquemático del prototipo que se logró implementar de un Router Access Point que mediante una antena externa se conecta a una antena regional distribuidora de Internet WiFi, y mediante otra antena secundaria mediante la función Hostap se distribuye internet dentro de un hogar cliente y todo esto mediante una Raspberry Pi 4 corriendo un Sistema Operativo FreeBSD.

La integración del WiFi con las Redes Definidas por Software (SDN) en el contexto de las ciudades inteligentes ofrece oportunidades para una gestión más eficiente y flexible de la infraestructura de red. Las SDN permiten una separación y centralización del plano de control de la red, facilitando una programación autónoma e independiente del hardware subyacente. Esta arquitectura proporciona una mayor agilidad y capacidad de respuesta a las demandas cambiantes de conectividad en entornos urbanos dinámicos, optimizando el uso de los recursos de red y mejorando la calidad del servicio para los usuarios. Por lo tanto, el WiFi seguirá siendo una tecnología clave en las redes de alta velocidad, con desarrollos futuros que prometen superar las limitaciones actuales y potenciar su integración en infraestructuras avanzadas como las ciudades inteligentes. La combinación de WiFi y SDN representa una sinergia prometedora para abordar los desafíos de conectividad y gestión de redes en entornos urbanos modernos.

Tecnología 5G presente y futuro

La tecnología 5G representa un avance significativo en las comunicaciones inalámbricas, ofreciendo mejoras sustanciales en velocidad, latencia y capacidad de conexión en comparación con las generaciones anteriores. Estas características la posicionan como un componente esencial en el desarrollo de ciudades inteligentes y la integración con redes definidas por software (SDN). Se distingue por su alta velocidad de transmisión de datos, alcanzando hasta 10 Gbps, lo que supone un incremento de 10 a 100 veces respecto a las redes 4G y 4.5G. Además, ofrece una latencia extremadamente baja, cercana a 1 milisegundo, en contraste con los 100-150 milisegundos típicos del 4G. Esta reducción en la latencia es crucial para aplicaciones que requieren respuestas en tiempo real, como vehículos autónomos y cirugía remota. Asimismo, el 5G soporta una mayor densidad de dispositivos conectados, permitiendo hasta un millón de conexiones por kilómetro cuadrado, lo que facilita la expansión del Internet de las Cosas (IoT) en entornos urbanos. Se anticipa que para 2030, el 80% del tráfico móvil global será gestionado por redes 5G, impulsado por el aumento en el consumo de servicios de streaming y aplicaciones de realidad virtual y aumentada. Además, se espera que el 5G evolucione hacia una mayor integración con la inteligencia artificial, optimizando la gestión de redes y habilitando aplicaciones más avanzadas en diversos sectores.

Por otra parte, una de las desventajas es que 5G conlleva costos significativos asociados a la actualización de la infraestructura existente y la instalación de nuevas estaciones base, como expone Vexler (2021). Las empresas pueden utilizar la flexibilidad del plano de control 5G para operar una gama completa de tecnologías de comunicaciones de manera consistente, incluyendo 4G, 5G, WiFi 6E y servicios de fibra. Sin embargo, las ventajas superan estas inversiones iniciales, ofreciendo velocidades de transmisión más rápidas, menor latencia y la capacidad de conectar una mayor cantidad de dispositivos simultáneamente. Entre las desventajas, se incluyen preocupaciones sobre la seguridad de los datos debido al incremento de dispositivos conectados y la necesidad de garantizar la cobertura en áreas rurales, donde la infraestructura puede ser limitada. La combinación del 5G con las SDN permite una gestión más eficiente y flexible de las redes urbanas. Las SDN facilitan la programación y control centralizado de la red, mientras que el 5G proporciona la infraestructura inalámbrica necesaria para soportar aplicaciones de alta demanda de datos y baja latencia. Esta sinergia es fundamental para



el desarrollo de ciudades inteligentes, donde se requiere una conectividad robusta y adaptable para servicios como gestión del tráfico, monitoreo ambiental y sistemas de seguridad pública.

Vexler (2021). Actualmente, las redes WiFi operan principalmente en interiores y no brindan una integración perfecta con las redes exteriores. 5G NR permite una transición fluida entre estos entornos para mejorar la conectividad de las empresas.

Redes Definidas por Software (SDN) y su impacto en la gestión de redes de alta velocidad y ciudades inteligentes.

Las Redes Definidas por Software (SDN) han revolucionado la gestión de las infraestructuras de red al introducir una arquitectura que separa el plano de control del plano de datos, permitiendo una programación centralizada y una mayor flexibilidad en la administración del tráfico. Esta innovación surgió como respuesta a las limitaciones de las redes tradicionales, que presentaban desafíos en términos de escalabilidad, adaptabilidad y eficiencia operativa.

Singh, S., & Jha, R. K. (2020). El despliegue de SDN en redes de telecomunicaciones ha permitido una optimización del uso del espectro y una mejora en la calidad del servicio, especialmente en redes inalámbricas de alta densidad.

Contribuciones de las SDN a las Redes Informáticas Actuales

Las SDN ofrecen una serie de beneficios que han transformado las redes informáticas contemporáneas:

- **Gestión Centralizada:** Los administradores pueden controlar la red desde una ubicación central, simplificando la configuración y el mantenimiento de los dispositivos de red.

Vexler (2021). En la Industria 4.0, los ordenadores, con una mínima supervisión humana, toman decisiones y controlan todos los procesos. Deben existir varios elementos críticos para ofrecer operaciones en tiempo real, incluidos los nuevos servicios introducidos con 5G.

- **Flexibilidad y Escalabilidad:** La separación del plano de control y de datos permite ajustar dinámicamente la infraestructura de red para satisfacer las necesidades cambiantes de las organizaciones, facilitando la adición o eliminación de dispositivos y la modificación de configuraciones sin cambios físicos en la infraestructura.



Pacheco Armijos, X. del C. (2024). Mininet, enfocado en redes definidas por software (SDN), permite la configuración detallada de parámetros de red como retrasos y ancho de banda.

- **Mayor Visibilidad y Seguridad:** SDN proporciona una visión integral de la red, lo que facilita la supervisión del rendimiento y la identificación de amenazas de seguridad. La capacidad de segmentar la red y aplicar políticas de seguridad de manera centralizada mejora la protección contra ataques y accesos no autorizados.

Rafamantanantsoa, J. A., Aubert, V., & Haja, R. (2021). Incrementar la seguridad de las redes digitales empresariales constituye una necesidad para garantizar la integridad y usabilidad de los datos y los recursos digitales de las empresas.

- **Eficiencia Operativa:** La automatización de tareas y la capacidad de programar la red reducen la complejidad y los errores humanos, mejorando la eficiencia operativa y permitiendo una respuesta más rápida a las incidencias.

Kreutz, D., Ramos, F. M. V. (2014). La implementación de SDN en centros de datos ha demostrado reducir significativamente el consumo energético al permitir el apagado dinámico de enlaces y dispositivos según la carga de la red.

La adopción de SDN ha tenido un impacto significativo en la industria y la investigación en redes. Empresas y organizaciones han implementado SDN para mejorar la eficiencia y reducir costos, mientras que la comunidad académica ha explorado nuevas aplicaciones y mejoras en la arquitectura de SDN, en palabras de Acebo, Danilo & Navia, Marlon. (2021). Las SDN permiten el desarrollo de aplicaciones personalizadas que responden a las necesidades particulares de cada operador de red, facilitando la innovación y adaptación a requerimientos específicos. Estudios comparativos han demostrado que las SDN superan a las arquitecturas tradicionales en términos de rendimiento y flexibilidad, el balanceo de carga en redes SDN facilita la distribución eficiente del tráfico entre servidores, permitiendo una mejor escalabilidad y un uso más óptimo de los recursos disponibles (Kreutz, D., Ramos, F. M. V. 2014), consolidándose como la opción preferida para el diseño de redes modernas. Su implementación ha transformado la manera en que se diseñan y operan las redes modernas, aportando mejoras sustanciales en términos de control, escalabilidad y capacidad de adaptación a las demandas cambiantes del entorno tecnológico actual.



Kreutz, D., Ramos, F. M. V. (2014). La mayoría de los estudios revisados destacan los beneficios de 5G en términos de conectividad y mejora del rendimiento de la red, pero también enfatizan la necesidad de nuevos enfoques en el diseño de infraestructura y la gestión del espectro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis exhaustivo de la literatura científica y los datos provenientes de informes tecnológicos ha permitido extraer conclusiones que enriquecen el conocimiento sobre la implementación de arquitecturas SDN sobre FreeBSD en combinación con tecnologías de última generación, como WiFi 6E y 5G, para el abordaje de los retos de la última milla en entornos de alta densidad de usuarios con miras de las redes inteligentes hacia el 2030. En primer lugar, es innegable que el paradigma SDN, al posibilitar la centralización del control y la automatización de la gestión de recursos, se erige como una herramienta fundamental para superar las limitaciones inherentes a las redes tradicionales. La capacidad de adaptar dinámicamente la asignación del espectro y de responder a las variaciones en la demanda de tráfico se traduce en mejoras considerables en la eficiencia operativa y en la calidad del servicio. La literatura revisada evidencia, de forma consistente, que este enfoque no solo facilita la escalabilidad y flexibilidad de la infraestructura, sino que también reduce de manera sustancial la latencia, permitiendo disminuirla hasta en un 80% en entornos urbanos densamente poblados, según estudios recientes según Kreutz, D., Ramos, F. M. V. (2014). Los casos de uso más discutidos en ciudades inteligentes incluyen el transporte, la seguridad pública, la salud, el turismo, el entretenimiento y la educación, destacándose el transporte como el escenario más mencionado. Por otro lado, FreeBSD se posiciona como una plataforma sólida para el despliegue de SDN debido a su estabilidad, compatibilidad con tecnologías emergentes y optimización del tráfico de red. Sin embargo, la automatización avanzada y la capacidad de adaptación dinámica al tráfico dependen de SDN, que permite gestionar de manera centralizada y dinámica del tráfico, lo que reduce la latencia y mejora la eficiencia en redes con alta demanda de datos (Singh, S., & Jha, R. K. 2020), y los recursos de red en tiempo real. La evolución de FreeBSD y su creciente compatibilidad con tecnologías como WiFi 6E han sido factores decisivos para optimizar la gestión del tráfico y la mitigación de interferencias. Estudios consultados muestran que, al integrarse con SDN, como se comenta en FreeBSD vs Linux: comparación. (s. f.). FreeBSD es conocido por su estabilidad, confiabilidad y



optimización para tareas de servidor. Ofrece un buen rendimiento y una utilización eficiente de los recursos.

La incorporación de la tecnología 5G, por su parte, se destaca como un componente transformador para la última milla. Los informes técnicos y los análisis académicos coinciden en que 5G ofrece una capacidad de transmisión significativamente superior, con velocidades que pueden alcanzar los 10 Gbps y una latencia reducida a menos de 1 ms, elementos críticos para el desarrollo de ciudades inteligentes y aplicaciones que requieren comunicaciones en tiempo real como describe Kreutz, D., Ramos, F. M. V. (2014). 5G permite la segmentación de red (network slicing), lo que facilita la asignación eficiente de recursos para diferentes aplicaciones y servicios. La computación en el borde (edge computing) optimiza la latencia y mejora la distribución de carga en la red. La sinergia entre 5G y SDN facilita la coordinación entre redes móviles y fijas, permitiendo una asignación eficiente del espectro y una mejora sustancial en la resiliencia y adaptabilidad de la red ante cambios en la demanda. Adicionalmente, la integración de WiFi 6E y 5G con SDN permite la asignación dinámica del espectro mediante mecanismos de orquestación centralizada. WiFi 6E, al operar en la banda de 6 GHz, mitiga la saturación del espectro en entornos urbanos, mientras que 5G complementa la red con conectividad de baja latencia y alta capacidad en redes móviles. SDN gestiona ambos entornos mediante segmentación de tráfico y priorización de servicios críticos, optimizando la experiencia del usuario, como describe Lezama Ojeda, A. (2020). Se logró la implementación de un Access Point en una Raspberry Pi 3, permitiendo conexión de clientes WiFi y validando su estabilidad con FreeBSD. Ya hay intentos experimentales en prototipo, pero aún se necesita incrementar el apoyo a estos proyectos para impulsar su pronto desarrollo de soporte de hardware de última generación de manera nativa.

Vexler (2021). WiFi 6 y 5G son tecnologías complementarias diseñadas para diferentes casos de uso: WiFi 6 para redes locales y de alta velocidad, mientras que 5G se orienta a redes de área amplia con mejor cobertura y movilidad.

Asimismo, la convergencia de estas tecnologías abre nuevas perspectivas para la integración de algoritmos de inteligencia artificial y sistemas de aprendizaje automático. Esta integración multidisciplinaria se perfila como el siguiente paso lógico para potenciar la capacidad predictiva y



adaptativa de las redes, optimizando la asignación de recursos en tiempo real y fortaleciendo la respuesta ante incidencias. La revisión de la literatura sugiere que tales innovaciones son imprescindibles para afrontar los desafíos de la hiperconectividad en las ciudades del futuro. No obstante, es pertinente reconocer que, a pesar de los avances alcanzados, persisten desafíos técnicos, especialmente en lo que respecta a la compatibilidad y optimización de controladores para dispositivos 5G en entornos basados en FreeBSD. Adicionalmente, la seguridad sigue siendo un reto en entornos de SDN abiertos, Singh, S., & Jha, R. K. (2020). "SDN proporciona mecanismos avanzados de seguridad mediante la segmentación del tráfico y la implementación de políticas de acceso dinámicas que refuerzan la protección ante ataques y brechas de seguridad, donde la centralización del control puede ser un objetivo atractivo para ataques dirigidos. Y recordemos que como señala Singh, S., & Jha, R. K. (2020). La arquitectura SDN permite disminuir los costos de implementación y mantenimiento de infraestructuras de red mediante la automatización de tareas y la reducción de la dependencia de hardware especializado, todo esto aplica en la actualidad a baja y mediana escala. Pero la falta de homogeneidad en implementaciones SDN también puede afectar su integración con equipos heterogéneos, limitando la interoperabilidad. Además, la infraestructura SDN requiere una mayor capacidad de procesamiento, lo que puede aumentar la demanda energética en despliegues a gran escala. Estos aspectos subrayan la necesidad de mayor investigación y colaboración entre la comunidad académica y la industria para optimizar la resiliencia y eficiencia energética en infraestructuras de red basadas en SDN y FreeBSD.

CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica respalda firmemente la viabilidad y el potencial transformador de una arquitectura SDN sobre FreeBSD, enriquecida con WiFi 6E y 5G, como estrategia integral para optimizar la conectividad en la última milla en entornos de alta densidad de usuarios. Este enfoque no solo mejora la eficiencia y la calidad del servicio, sino que también establece un marco conceptual robusto para futuras investigaciones y desarrollos. La combinación de SDN y FreeBSD permite la creación de redes de comunicación más inteligentes y adaptativas, con una gestión más eficiente de los recursos y una reducción significativa en la latencia y la congestión de tráfico. Además, la

implementación de WiFi 6E y 5G en este ecosistema mejora la capacidad de respuesta ante la creciente demanda de servicios de conectividad de alta velocidad.

Sin embargo, la adopción masiva de estas tecnologías aún enfrenta desafíos, particularmente en términos de seguridad, interoperabilidad y consumo energético. La centralización del control en SDN plantea riesgos de ciberseguridad que deben ser abordados mediante arquitecturas más resilientes y mecanismos de detección de amenazas en tiempo real. Además, la falta de estandarización en la implementación de SDN con diferentes plataformas y dispositivos puede representar una barrera para su integración fluida en redes ya existentes. En este contexto, resulta imperativo continuar con la investigación y el desarrollo colaborativo entre la academia, la industria y la comunidad de desarrolladores, con el fin de perfeccionar y ampliar el alcance de estas tecnologías emergentes. Solo a través de un esfuerzo conjunto será posible consolidar redes más eficientes, seguras y sostenibles, que respondan a las necesidades de la hiperconectividad en la era digital y sienten las bases para la evolución de ciudades inteligentes interconectadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acebo, Danilo, Navia, Marlon, & Romero, Wilson. (2021). Revisión de estudios sobre redes definidas por software aplicados en Universidades Ecuatorianas. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*, 5(2), 102.
<https://doi.org/10.33936/isrtic.v5i2.3951>
- Administración de paquetes y servicios en FreeBSD / OpenBSD / NetBSD. (s. f.). En HostZealot. Recuperado de <https://es.hostzealot.com/blog/about-vps/administracion-de-paquetes-y-servicios-en-freebsd-openbsd-netbsd>
- Capítulo 34. Redes Avanzadas. (s. f.). En FreeBSD Documentation. Recuperado de <https://docs.freebsd.org/es/books/handbook/advanced-networking/>
- Díaz Meza, Y. M., Valentín Melgarejo, T. F., Álvarez López, J. R., & Ortiz Recinas, J. G. (2021). Influencia del Internet en el rendimiento académico de los estudiantes de educación básica regular. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(3), 2477-2490.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.465



- Emulación Linux(R) en FreeBSD. (s. f.). En FreeBSD Documentation. Recuperado de <https://docs.freebsd.org/es/articles/linux-emulation/>
- FreeBSD Project. (2024). FreeBSD 13.4 hardware notes. FreeBSD. Recuperado el [fecha de acceso], de <https://www.freebsd.org/releases/13.4R/hardware/>
- FreeBSD vs Linux: comparación. (s. f.). En Serverspace. Recuperado de <https://serverspace.io/es/about/blog/freebsd-vs-linux-comparison/>
- Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2014). Software-defined networking: A comprehensive survey. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1406.0440>
- Lehr, W., & McKnight, L. W. (2003). Wireless Internet access: 3G vs. WiFi?. Telecommunications Policy, 27(5-6), 351-370. [https://doi.org/10.1016/S0308-5961\(03\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0308-5961(03)00004-1)
- Lezama Ojeda, A. (2020). Router ARM AP+Cliente embebido, basado en FreeBSD para redes inalámbricas [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara]. Repositorio Institucional UdeG. <https://hdl.handle.net/20.500.12104/96365>
- Lezama Ojeda, A., & Orizaga Trejo, J. A. (2024). Superando el Desafío de la Última Milla y la Brecha Digital: Perspectivas para México en el Horizonte 2030. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(1), 1433-1457. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9538
- Li Peng, Sr. (2024). La conectividad ubicua forja un futuro inteligente. Huawei Corporate. <https://www.huawei.com>
- Ma, Z., Zhang, Z. Q., Ding, Z. G., Fan, P. Z., & Li, H. C. (2015). Key techniques for 5G wireless communications: Network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives. Science China Information Sciences, 58(041301), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11432-015-5293-y>
- Morales Villegas, H. V., Orozco Morocho, D. J., Morales Barreno, A. S., Pinto Muñoz, F. P., & Duque Fernández, I. S. (2024). Agricultura de precisión de un invernadero a través de virtualización y comunicación IoT. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(6), 6088-6099. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15304



- Noll Barreto, A., Faria, B., Almeida, E., Rodriguez, I., Lauridsen, M., Amorim, R., & Vieira, R. (2016). 5G – Wireless Communications for 2020. *Journal of Communication and Information Systems*, 31(1), 146-157. <https://doi.org/10.14209/jcis.2016.14>
- Pacheco Armijos, X. del C., Cartuche Calva, J. J., & Loja Mora, N. M. (2024). Herramientas de Software para Simulación y Emulación de Redes de Computadoras: Implementación en Entornos de Laboratorio. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 11271-11285. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12276
- Preguntas Frecuentes para FreeBSD 11.X, 12.X, y 13.X. (s. f.). Recuperado de <https://docs.freebsd.org/es/books/faq/>
- Rafamantanantsoa, J. A., Aubert, V., & Haja, R. (2021). Evaluación del rendimiento de cortafuegos basados en software libre. ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/358904154_Evaluacion_del_rendimiento_de_cortafuegos_basados_en_software_libre
- Singh, S., & Jha, R. K. (2020). A survey on software-defined networking: Architecture for next-generation network. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2001.10165>
- Stewart, B., Vexler, M., Abouahmed, M. O., & Ashraf, M. (2023). 5G vs. Wi-Fi 6: A False Dilemma. *Integra100*. <https://www.integra100.com>
- Vexler, M. (2021). 5G vs Wi-Fi 6: A false dilemma. *IEEE Communications Society*. Recuperado de https://www.academia.edu/45156345/5G_vs_Wi_Fi_6_A_False_Dilemma
- Yang, C., Liang, P., Fu, L., Cui, G., Huang, F., Teng, F., & Bangash, Y. A. (2022). Using 5G in Smart Cities: A Systematic Mapping Study. *Intelligent Systems with Applications*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2202.04312>
- Yu, H., Lee, H., & Jeon, H. (2017). What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements. *Sustainability*, 9(10), 1848. <https://doi.org/10.3390/su9101848>

