

Construcción de red móvil con tecnología NSA y análisis de QoE para servicio de Videostreaming

Mobile network construction with NSA technology and QoE analysis for Video Streaming service

Ing(c). Claudia Tatiana Arcila-Pineda ¹, Ing. Santiago Martínez-Ardila ¹
Ing(c). David Alejandro Monedero-Ortiz ¹, PhD. Wilmar Yesid Campo-Muñoz ¹

¹ Universidad del Quindío, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería Electrónica,
Carrera 15 # 12N, Armenia, Quindío, Colombia

Correspondencia: claudiat.arcilap@uqvirtual.edu.co, wycampo@uniquindio.edu.co

Recibido: 18 marzo 2024. Aceptado: 5 junio 2024. Publicado: 1 julio 2024.

Cómo citar: C. T. Arcila Pineda, S. Martínez Ardila, D. A. Monedero Ortiz, y W. Y. Campo Muñoz, «Construcción de red móvil con tecnología NSA y análisis de QoE para servicio de Videostreaming», RCTA, vol. 2, n.º 44, pp. 1–11, jul. 2024.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/2827>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: El crecimiento exponencial del tráfico de datos ha generado una presión en las infraestructuras de redes móviles existentes, que se ven desafiadas a proporcionar una experiencia de usuario satisfactoria. Por tanto, este artículo aborda la construcción de una red móvil utilizando tecnología de código abierto como Mosaic5G y el análisis de métricas objetivas de calidad de experiencia (QoE) de un servicio de videostreaming. Durante el proceso, se estableció un servidor y un cliente para la transmisión de video, se programaron tarjetas SIM para el acceso a la red y se utilizó la herramienta FFmpeg para obtener métricas objetivas de QoE. Los resultados revelaron la robustez de las tecnologías de software libre en la construcción de redes móviles funcionales y su capacidad para brindar una QoE buena para el servicio más demandado y con mayor consumo de ancho de banda mediante los codificadores de video H.264 y H.265.

Palabras clave: Calidad de Experiencia, Red Móvil, SDN, SDR, Videostreaming.

Abstract: The exponential growth of data traffic has put pressure on existing mobile network infrastructures, which are challenged to provide a satisfactory user experience. Therefore, this paper addresses the construction of a mobile network using open source technology such as Mosaic5G and the analysis of objective quality of experience (QoE) metrics of a videostreaming service. During the process, a server and client were set up for video streaming, SIM cards were programmed for network access, and the FFmpeg tool was used to obtain objective QoE metrics. The results revealed the robustness of open source technologies in building functional mobile networks and their ability to provide good QoE for the most demanded and bandwidth-intensive service using H.264 and H.265 video encoders.

Keywords: Quality of Experience, Mobile Network, SDN, SDR, Video Streaming.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de rápida evolución tecnológica, el aumento exponencial en la adopción de dispositivos inteligentes y la creciente demanda de conectividad móvil ha ejercido una presión sin precedentes sobre las infraestructuras de red existentes [1]. Para el año 2025, se proyecta que el tráfico total de datos móviles aumente casi cinco veces en comparación con los niveles de 2019, llegando a 164 Exabytes (EB) al mes [2]. Este volumen será consumido por una población de más de 6 mil millones de dispositivos [3]. Esto impulsado en gran medida por la proliferación de aplicaciones multimedia y servicios de videostreaming.

Por otra parte, la evolución de la computación en la nube y las tecnologías de código abierto permiten que las arquitecturas de redes móviles puedan ser desplegadas mediante software, esto es, la Infraestructura como Servicio (IaaS) [4], [5] dando origen a tecnologías como Redes de Acceso de Radio Abierto (OpenRAN), Redes Definidas por Software (SDN) y Virtualización de Funciones de Red (NFV), que prometen abordar los desafíos de flexibilidad y escalabilidad que enfrentan las infraestructuras de red. Sin embargo, el éxito de estas tecnologías radica en gran medida en la experiencia de los usuarios. Esto cobra aún más relevancia para el servicio de videostreaming, ya que representa al 65% del tráfico de las redes de datos [5], [6].

De acuerdo a lo anterior, en este artículo se aborda el desafío de la obtención de la calidad de experiencia (QoE) para el servicio de videostreaming sobre una red móvil construida bajo el concepto de IaaS. La estimación de la QoE es un problema abierto por estar sujeto a la subjetividad de los usuarios [6], por lo que diferentes investigaciones se han centrado en obtener la QoE usando métricas objetivas [7], [8], [9], [10], [11]. Por tanto, en este artículo se analizan métricas objetivas de la QoE como son, la Relación Máxima Señal a Ruido (PSNR), Índice de Similitud Estructural (SSIM) y Fusión de Evaluación Multimétodo en Video (VMAF) [12].

Por consiguiente, este artículo presenta como aportes la construcción de una red móvil celular mediante tecnologías de Código Abierto (OSS) y el análisis de métricas objetivas de la QoE para el servicio de videostreaming. Para lograr este

propósito, se construye una red móvil de cuarta generación Evolución a Largo Plazo-No Independiente (4G-LTE-NSA) a partir del ecosistema de código abierto, denominado Mosaic5G [13]. En esta red se despliega un servidor y un cliente, por medio de los Equipos de Usuario (UE), con el fin de obtener y analizar las métricas objetivas de QoE.

Los experimentos se realizan para calidades de video 480p y 720p, cada uno codificado tanto en H.264 como en H.265. Los resultados obtenidos demuestran la estabilidad de la red construida y valores adecuados de las métricas objetivas de QoE para la transmisión de Video Bajo Demanda (VoD).

El artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 1, presenta la introducción y su respectiva contextualización de la temática; la sección 2, describe la metodología con los materiales y métodos; la sección 3, expone los resultados y análisis de los experimentos; finalmente la sección 4, recoge las conclusiones y trabajos futuros que se derivan de este artículo.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se adoptó la metodología en cascada [14], donde se puede identificar dos énfasis o tareas secuenciales específicas, las cuales son; el desarrollo del Núcleo de Red (CN) y el análisis de las métricas QoE objetivas, ver Fig. 1.

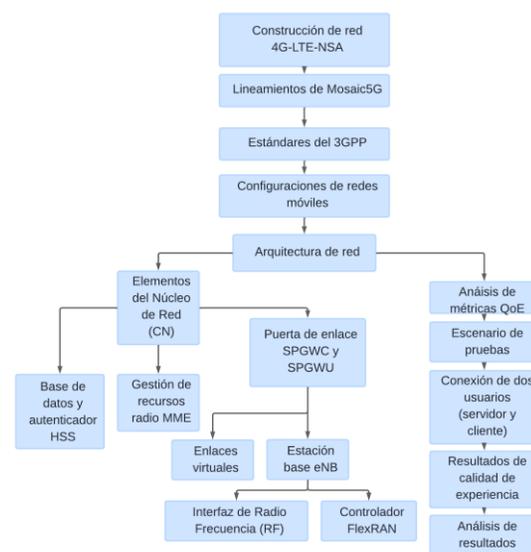


Fig. 1. Explicación de los métodos.
Fuente: elaboración propia.

Para lograr la obtención de métricas QoE, se llevó a cabo la construcción de una red 4G-LTE-NSA sobre un dispositivo computacional portátil Acer Aspire Nitro Intel Core i5 10300H con 8GB de RAM, dentro de un sistema operativo Linux Ubuntu 20.04, bajo los lineamientos de Mosaic5G, el cual, sigue los estándares del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) que constituyen los parámetros para las configuraciones de redes móviles [15]; y del mismo modo, la arquitectura de red que se escogió es la misma que se encuentra en el repositorio oficial de este ecosistema [13].

Esta arquitectura describe los elementos del CN tales como la base de datos y el Autenticador Servidor de Abonados a Domicilio (HSS), el encargado de la gestión de recursos radio Entidad de Gestión de la Movilidad (MME), la Puerta de Enlace entre el Plano de Control (SPGWC) y la Puerta de Enlace entre el Plano de Usuarios (SPGWU). En donde cada uno de estos elementos se interconectan entre sí por medio de interfaces virtuales; y a su vez, conectados directamente con la estación base NodoB evolucionado (eNB) que incorpora una interfaz de Radio Frecuencia (RF), para la cual se utiliza el módulo hardware Ettus USRP B200 ENC con antenas VERT2450 (2.4-2.5 y 4.9-5.9 GHz) Doble Banda, la Red de Acceso Radio (RAN) y el controlador FlexRAN.

En la Fig. 2, se puede evidenciar el escenario de experimentación completo, en donde la arquitectura de red, suministra servicios de red a dos UE, los cuales cumplen el rol de servidor y cliente.

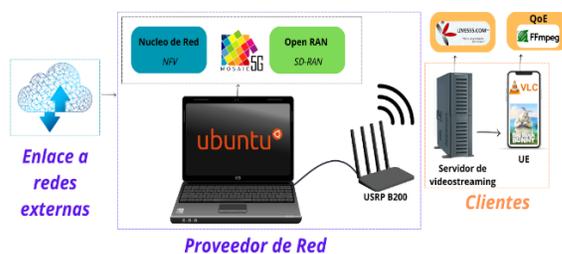


Fig. 2. Escenario de pruebas.
Fuente: Elaboración propia.

El servidor, desplegado dentro de un dispositivo móvil Xiaomi 11 Mi Lite 5G NE, se encargó de proporcionar y transmitir videos en las calidades 480p y 720p cada uno bajo los codificadores de video H.264 y H.265, por medio del servidor Live555; el cliente es desplegado en un dispositivo móvil Asus Zenphone, donde son recibidos y almacenados mediante VLC (cliente Video-LAN).

Los roles de estos dispositivos se lograron a través Linux dentro de Termux y RealVNC [16], [17].

En ambos dispositivos móviles se integró una tarjeta SIM Sysmocom SJS1 para acceder a los recursos de la red siendo autenticados dentro de la misma; la cual se programó por medio del lector de tarjetas MV PS/SC ISO 7816 con los parámetros de validación que se almacenan en el HSS.

Con la red construida y el servicio de video en funcionamiento, se realizó la obtención de las métricas objetivas de QoE, las cuales corresponden a métricas de referencia completa, lo que significa que compara el video origen con el video en el cliente, para determinar el efecto que causa la red sobre él mismo [18]. Para llevar a cabo este proceso, se utilizó la herramienta de software libre Ffmpeg, que permite obtener los valores de la relación señal a ruido PSNR, la luminancia, contraste y estructura de SSIM; y los fotogramas de VMAF.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se describe el proceso mediante el cual se consolidó el escenario de experimentación, que consta de tres componentes, el primero de ellos es la infraestructura de red móvil construida mediante OSS; el segundo corresponde a la construcción y el consumo del servicio de videostreaming sobre la infraestructura de red y finalmente, el tercer componente relacionado a la obtención y análisis de las métricas objetivas de la QoE.

3.1 Componente uno: Construcción de núcleo de red 4G-LTE-NSA

De forma preliminar para realizar la construcción de la red, es necesario descargar la documentación oficial del repositorio Mosaic5G desde [13]. Donde además de contener el código base, se muestra paso a paso la instalación de los recursos necesarios, como las carpetas snap de los elementos CN y la Red de Acceso por Radio (RAN). Además, presenta componentes complementarios para la construcción del núcleo de red, como son los controladores de la interfaz RF, los controladores de programación de tarjetas SIM, que vienen con funciones de virtualización, entre otros.

Dentro de los pasos complementarios, se llevó a cabo la conexión a la base de datos Cassandra DB alojada en un contenedor Docker para que el HSS pueda manejar de forma eficiente la información; posteriormente, se modificó el Sistema de Nombres

de Dominio (DNS) dentro del archivo de configuración spgwc.conf para lograr que la red reconozca adecuadamente las solicitudes enviadas por parte de los usuarios.

Con las modificaciones previamente mencionadas, se da inicio a la ejecución del CN por medio de las siguientes líneas de comandos: sudo oai-hss, oai-mme, oai-spgwc y oai-spgwu; de forma ordenada, ya que cada una depende de la anterior, cuya respuesta se observa en la Fig. 3.

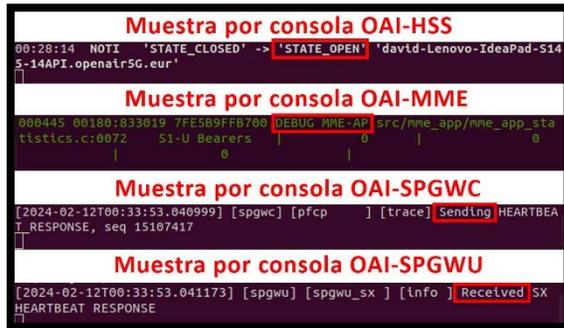


Fig. 3. Funcionamiento del CN.
 Fuente: Elaboración propia.

En donde el HSS genera un “STATE_OPEN”, indicando que está abierto a las solicitudes entrantes de los usuarios, el MME que muestra su tabla de registros; y las interfaces spgwc y spgwu las cuales, constantemente envían un “HEARTBEAT_RESPONSE” entre ellas para estar permanentemente reconociendo el estado de sí mismas, hasta la llegada de un usuario.

Puesto que el propósito es transmitir inalámbricamente es necesario tener una unidad radio, para esto se recurre a la tecnología SDR usando la USRP B200, la cual se conectó mediante puerto USB 3.0 al equipo de cómputo que contiene el CN; y por medio del comando: sudo uhd_usrp_probe, se verificó el estado de conexión de este dispositivo RF.

Con la unidad de radio conectada se procede al despliegue de la RAN y del respectivo controlador FlexRAN, los cuales se encargan del funcionamiento del nodo eNB, en donde la RAN se encarga de dar acceso por radiación a los usuarios, y el controlador se encarga de administrar de forma gráfica y eficiente todos los parámetros asociados con los usuarios y el flujo de datos que estos presentaran.

Además, para configurar la RAN adecuadamente se necesitó realizar una serie de ajustes previos dentro

del documento ran.enb-conf, para modificar el identificador de Red Móvil Terrestre Pública (PLMN), que se encarga de definir la ubicación y la red móvil a la cual va a pertenecer el usuario; en donde se asignan valores específicos de 208 en el Código de País Móvil (MCC) y 95 en el Código de Red Móvil (MNC), respectivamente; la modificación dentro de la interfaz SGI, con la dirección de Protocolo de Internet (IP) de la red proveedora de servicios para que el usuario tenga acceso a las redes externas; y finalmente, la configuración paralela en: PARALLEL_SINGLE_THREAD, siendo esta una configuración adecuada para los recursos computacionales utilizados para el CN y la RAN.

Una vez realizadas estas configuraciones, en la Fig. 4 se puede observar cómo es el despliegue de estos dos elementos, la RAN y el CN, en donde la línea “SCHED_MODE = 0” indica que la RAN está en total operación para radiar y recibir solicitudes de los usuarios y la FlexRAN se encarga de designar un valor numérico para la estación base (BS).

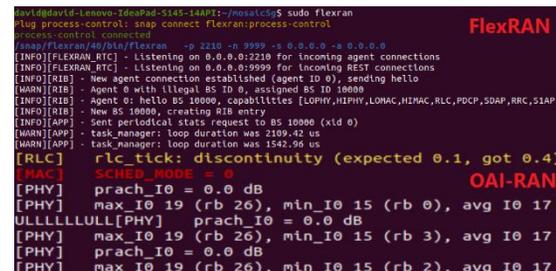


Fig. 4. Funcionamiento de la RAN y conexión con FlexRAN.
 Fuente: Elaboración propia.

Una vez, la RAN esta activa y en funcionamiento, el módulo MME agrega dicha estación dentro de sus tablas de control, indicando que los elementos del CN están conectados a la RAN y listos para operar, ver Fig. 5.

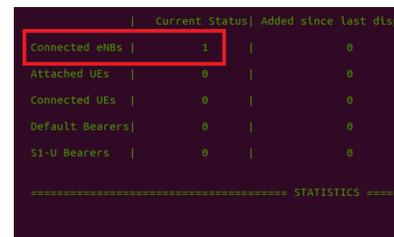


Fig. 5. Estación eNB conectada al MME.
 Fuente: Elaboración propia.

Al conectar un usuario móvil real, es importante declarar y configurar los parámetros clave de autenticación de los usuarios tanto en el módulo HSS y la respectiva programación de las tarjetas SIM para que sean congruentes; dichos parámetros

son el Identificador Único Móvil Internacional (IMSI), la Llave de Autenticación (Ki) y la Clave de Cifrado (OPC), y a través del comando: `sudo oai-hss.add-users -I(IMSI) -k(Ki) -o(OPC) -aoai.openair5G.eur`, quedan anexados al módulo HSS. En la Tabla 1 se observa como quedan almacenados los valores para 3 usuarios dentro del CN.

Tabla 1: Valores asignados a las tarjetas SIM

IMSI	Ki	OPC
20895000 0000005	CC19D59E808F0877F 1FC085A1EA2D1F0	8f60a0419289f779e e2c168c7e967d8c
20895000 0000001	8baf473f2f8fd09487ccc bd7097C6862	8e27b6af0e692e750 f32667a3b14605d
20895000 0000002	A5862EA2F7DE137C2 B9F2CDE59467E65	5ca47dbaff3e17db0 d72b015a5cc4321

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la programación de las tarjetas SIM, se copia el repositorio oficial de Pysim [19], proveniente de Sysmocom con el fin de extraer todos los elementos necesarios para la programación, y por medio del lector de tarjetas SIM, se lleva a cabo dicha programación, teniendo en cuenta los parámetros presentados en la Tabla 1.

Una vez la tarjeta está programada e instalada en el dispositivo móvil, el UE se registra y queda conectado a la red, lo cual se puede evidenciar a través de las tablas de control MME, la interfaz RAN e interfaz FlexRAN, ver Fig. 6.

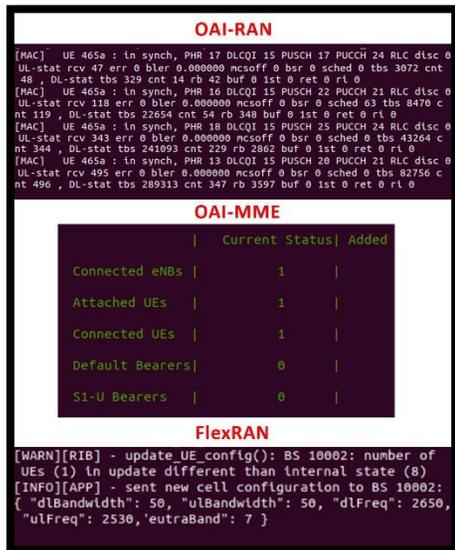


Fig. 6. Enlace de un usuario móvil real.
 Fuente: Elaboración propia.

En donde la FlexRAN indica el estado de “update” para referirse a una actualización en sus tablas con la llegada del usuario móvil, el MME autentifica el

usuario en su base de datos y proporciona servicios de red al mismo; y, por último, la RAN indica los recursos tanto del Enlace de Subida (Uplink) como el Enlace de Bajada (Downlink) que proporciona al usuario.

Adicionalmente, la FlexRAN cuenta con una Interfaz de Programación de Aplicaciones basada en la Transferencia de Estado Representacional (API REST) que genera un módulo de Red de Acceso Radio-Definido por Software (SD-RAN), el cual define las conexiones entre el usuario, el eNB y el CN, junto con información detallada, como el IMSI del usuario, la tasa de bits de UpLink y de DownLink, el ancho de banda y el canal, ver Fig. 7.

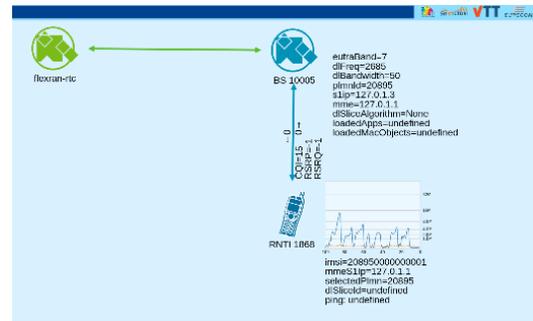


Fig. 7. Interfaz del controlador FlexRAN como SD-RAN.
 Fuente: Elaboración propia.

Para la conexión del segundo usuario, se optó por activar la función de "Hotspot móvil" desde el dispositivo principal (denominado UEs 1, según el MME). Esto transformó al teléfono móvil en un enrutador de paquetes, permitiendo así compartir la conexión de datos móviles con otros dispositivos [20]. De esta manera, el segundo usuario asume el rol de servidor dentro de la arquitectura, posibilitando una conexión efectiva en la red. Cabe resaltar que la dirección de red del dispositivo conectado al Hotspot es proveniente del CN.

En la Fig. 8, se puede ver el montaje real de todos los elementos del CN y la RAN, junto con los usuarios y el módulo USRP.



Fig. 8. Montaje real del CN y la RAN.
 Fuente: Elaboración propia.

3.2 Componente dos: Configuración del servidor y el cliente

Para garantizar el servicio de videostreaming y la visualización y reproducción VoD del mismo, se instaló un sistema Linux para Android denominado Termux, en ambos usuarios UE1 y UE2, respectivamente.

En la Fig. 9, se evidencia a partir de la terminal Termux, la asignación de las direcciones IP de la red móvil, además en la parte superior de la Fig. 9 el UE1 está anclado a la banda 4G, mientras que el UE2 tiene la conexión WiFi correspondiente al Hotspot móvil.

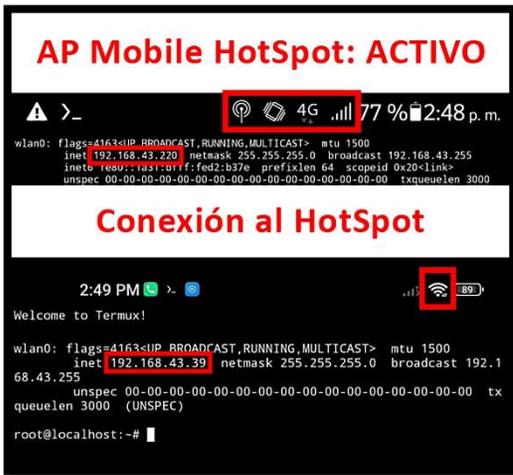


Fig. 9. Direcciones IP de los usuarios.
 Fuente: Elaboración propia.

Para el servidor, fue necesario la instalación de dependencias adicionales dentro del Termux, como el sistema operativo Ubuntu 20.04 por cuestiones de compatibilidad, el entorno de escritorio XFCE y el algoritmo Computacional Virtual de Red (VNC), para el funcionamiento de una aplicación denominada RealVNC que sirve como un visualizador y controlador de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).

En la Fig. 10, se puede observar como, por medio del comando: “live555MediaServer”, se genera la dirección URL con el protocolo de transmisión, en este caso, Protocolo de Streaming en Tiempo Real (RTSP), el socket y el espacio para designar el archivo de video.

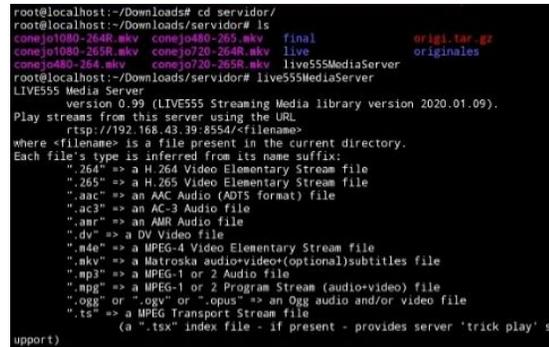


Fig. 10. Ejecución del servidor Live555 sobre el UE2.
 Fuente: Elaboración propia.

Por último, para consumir el video desde el lado del cliente, se inserta la dirección URL proveniente del servidor (UE2) por medio de la API de VLC como lo muestra la Fig. 11.



Fig. 11. Reproducción en VLC desde el UE1.
 Fuente: Elaboración propia.

3.3 Componente tres: Estimación y análisis de métricas objetivas de QoE

El análisis de métricas objetivas de QoE se llevó a cabo bajo los formatos de codificación H.264, por su adaptabilidad a diferentes entornos y requisitos de hardware, y su evolución H.265, el cual requiere precisamente la mitad del ancho de banda [21]. Esto para las calidades de video 480p y 720p.

Para la estimación de las métricas objetivas de referencia completa de QoE, se utiliza la herramienta FFmpeg, la cual utiliza el video recibido y el video original.

En cuanto a la obtención del video recibido, se usó un dispositivo computacional adicional anclado por medio del Hotspot, el cual recibe el nombre de UEs3 (según el MME).

Con base en lo anterior, en la Fig. 12, se muestra la ejecución del comando para la grabación desde el nuevo dispositivo computacional.

```

$ vlc --rtsp://192.168.43.39:8554/conejo480-264.mkv --sout=file:mp4:480-264-recv.mp4
VLC media player - 3.0.9.2 Vettinari
VLC debug: Copyright © 1996-2020 the VideoLAN team
VLC debug: revision 3.0.9.2-0-gdca1ae9d

...remote connection opened
Sending request: OPTIONS rtsp://192.168.43.39:8554/conejo480-264.mkv RTSP/1.0
Seq: 2
User-Agent: LibVLC/3.0.9.2 (LIVE555 Streaming Media v2020.01.19)

Received 152 new bytes of response data.
Received a complete OPTIONS response:
RTSP/1.0 200 OK
Seq: 2
Date: Fri, Mar 01 2024 17:06:30 GMT
Public: OPTIONS, DESCRIBE, SETUP, TEARDOWN, PLAY, PAUSE, GET_PARAMETER, SET_PARAMETER

Sending request: DESCRIBE rtsp://192.168.43.39:8554/conejo480-264.mkv RTSP/1.0
Seq: 3
User-Agent: LibVLC/3.0.9.2 (LIVE555 Streaming Media v2020.01.19)
Accept: application/sdp

Received 1088 new bytes of response data.
Received a complete DESCRIBE response:
RTSP/1.0 200 OK
Seq: 3
Date: Fri, Mar 01 2024 17:06:30 GMT
Content-Base: rtsp://192.168.43.39:8554/conejo480-264.mkv/
Content-Type: application/sdp

```

Fig. 12. Grabación por VLC en el cliente.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, las métricas objetivas de la QoE que se obtienen mediante FFMpeg son:

- PSNR: encargada de definir la relación entre la máxima energía posible de una señal y el ruido. Generalmente se expresa en decibelios (dB) y sus valores típicos están entre 30 y 50 dB, siendo mayor cuanto mejor es la codificación [22], [23].
- SSIM: se encarga de la evaluación estructural entre la imagen de referencia y la de prueba, analizando los componentes de luminancia y contraste, asignando una puntuación de 1 a la mayor similitud estructural generada [22].
- VMAF: incorpora un algoritmo de percepción visual humano el cual fue desarrollado por Netflix para el análisis bajo una gama de condiciones como la compresión, codificación y transmisión; donde el rango de valores va de 0 a 100, siendo los valores por encima de 70 considerados como buenos dentro de una evaluación objetiva [24], [25].

En la Fig. 13, se puede observar el comando para la extracción de cada una de estas métricas, junto con la librería del VMAF, puesto que no viene incluida por defecto en FFMpeg y la indicación del almacenamiento de los datos en el formato “.txt”.

```

ffmpeg -i conejo480-264-recv.mp4 -lavfi libvmaf="model_path=/home/david/vmaf-2.3.1/libvmaf/bool/src/vmaf_v0.6.1-iso:psnr:ssim:log_path=480-264.txt" -f null -
FFmpeg version 4.2.2 Copyright (c) 2000-2019 the FFmpeg developers
built with gcc 9 (Ubuntu 9.4.0-1ubuntu1~20.04.2)
configuration: --enable-libvmaf --enable-version3
Input #0: mov,mp4,m4a,3gp,3g2,mj2, from 'conejo480-264.mp4':
Metadata:
  major_brand      : Isom
  minor_version    : 512
  compatible_brands: isomiso2avc1mp41
  encoder          : LavF60.16.100
Duration: 06:02:00.00, start: 0.000000, bitrate: 840 kb/s
Stream #0:(und): Video: h264 (h264) (avc1 / 0x31537661), yuv420p(tv, bt709), 854x480 [SAR 1:1 DAR 427:240], 533 kb/s, 30 fps, 30 tbr, 15360 tbn, 60 tbc (default)
Metadata:
  handler_name     : VideoHandler
Stream #0:(und): Audio: aac (LC) (mp4a / 0x6314706D), 48000 Hz, stereo, fltp, 298 kb/s (default)
Metadata:

```

Fig. 13. Ejecución de FFMpeg para extracción de las métricas.

Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de mostrar los resultados mediante curvas, los datos son procesados en MATLAB [26]. Desde la Fig. 14 a la Fig. 16 se pueden observar los resultados para el video en la calidad 480p con los codificadores H.264 y H.265.

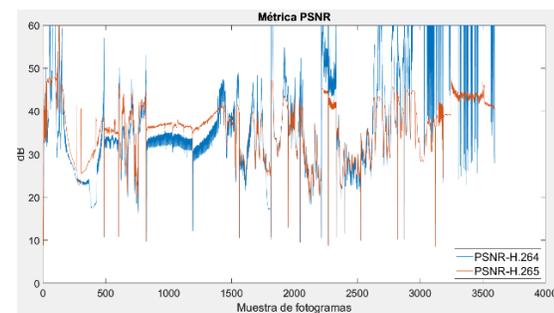


Fig. 14. Métrica PSNR de 480p con H.264 y H.265.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 14 se observa que las curvas de PSNR muestran valores superiores a 30 dB tanto para el codificador H.264 como para H.265, indicando una buena relación señal a ruido.

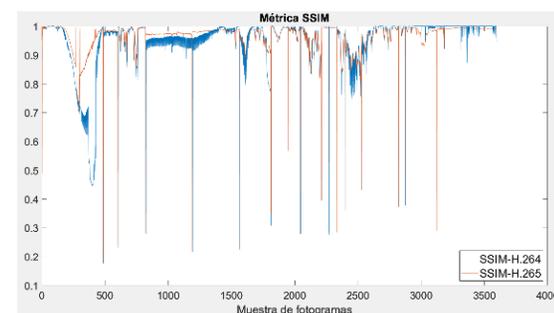


Fig. 15. Métrica SSIM de 480p con H.264 y H.265.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 15, se pueden observar los valores de SSIM, los cuales se aproximan a 1, por lo que la similitud estructural está cerca al valor ideal, en ambos codificadores de video, indicando que el video origen no es impactado de manera negativa respecto a los parámetros de luminancia y contraste, al ser transmitido y consumido en la red móvil.

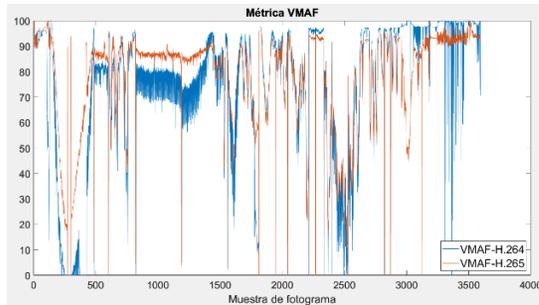


Fig. 16. Métrica VMAF de 480p con H.264 y H.265.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 16 se pueden observar los valores de VMAF, los cuales tienen una gran fluctuación, esto debido a, el canal inalámbrico y la captura de los fotogramas por segundo. Por lo tanto, para VMAF, se realizó un análisis adicional por medio de una línea de regresión ya que, dentro de las tres métricas, desempeña un papel fundamental al tener en cuenta aspectos perceptuales de la visión que un usuario real puede experimentar.

En la Fig. 17 se puede observar una pendiente positiva con un promedio aproximado de 70 entre los valores de VMAF y las muestras de fotogramas, indicando que la calidad percibida está mejorando a medida que avanza el video.

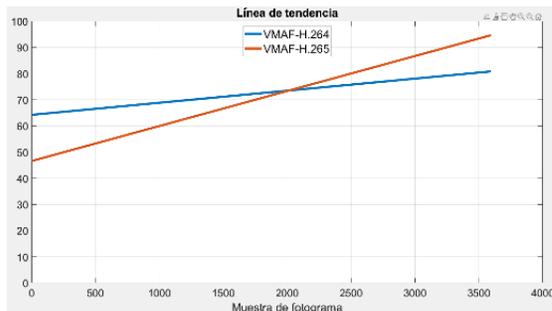


Fig. 17. Línea de regresión de VMAF para video de 480p con H.264 y H.265.
 Fuente: Elaboración propia.

Desde la Fig. 18 hasta la Fig. 20, se puede observar las métricas PSNR, SSIM y VMAF del video en la calidad 720p con los codificadores H.264 y H.265.

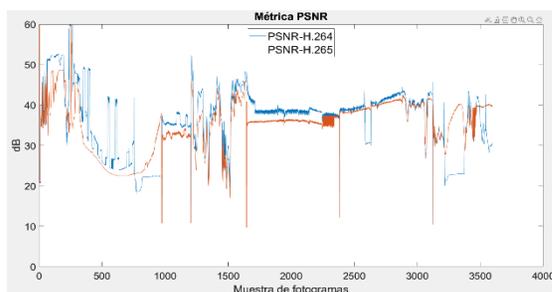


Fig. 18. Métrica PSNR de 720p con H.264 y H.265.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 18, se puede observar que la métrica de PSNR para el primer 27% de las muestras de fotogramas presenta fluctuaciones, generando una curva descendente, y para el resto de la curva se convierte en valores cercanos o iguales a 30 dB lo cual representa una buena correlación señal a ruido.

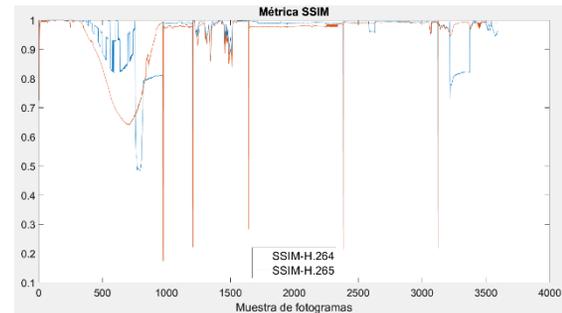


Fig. 19. Métrica SSIM de 720p.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 19, se puede apreciar la métrica SSIM con un patrón similar a la anterior. En el primer 11% con valores de 1 y posteriormente entre el 11% y el 27% se presenta una curva negativa que se estabiliza alcanzando nuevamente valores de 1 para ambas codificaciones. Estos resultados señalan una alta similitud estructural entre el video original y el procesado, lo que sugiere una calidad visual satisfactoria en ambos casos.

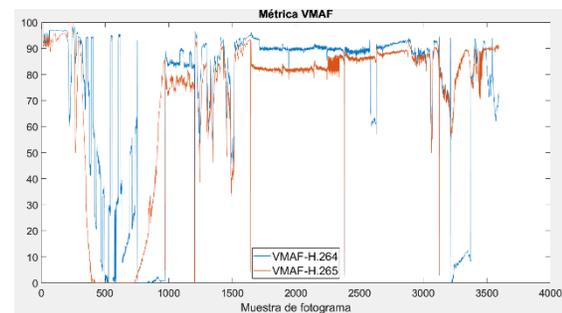


Fig. 20. Métrica VMAF de 720p con H.264 y H.265.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 20, en los valores de VMAF para ambas codificaciones, se observa un comportamiento similar al de las dos métricas previamente mencionadas. En el primer 11% se obtienen valores de 90 y entre el 11% y el 27% de la evaluación, se registran valores cercanos a cero; sin embargo, a medida que avanza el análisis, estos valores comienzan a aumentar hasta alcanzar cifras entre 70 y 90, con sus respectivas fluctuaciones.

En relación con esta última métrica, a pesar de los descensos iniciales, el análisis adicional mediante la recta de regresión revela que, a partir de la

correlación y los promedios obtenidos en el análisis matemático, se logra un promedio del 70% para ambas codificaciones de video, ver Fig. 21.

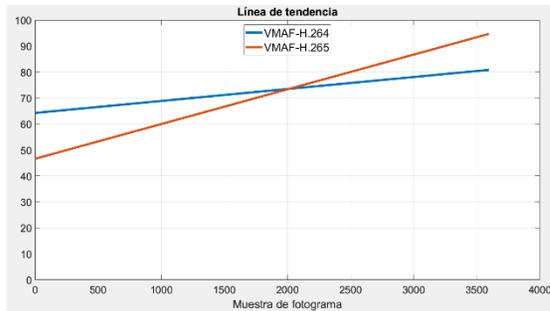


Fig. 21. Línea de tendencia de VMAF para video de 720p con H.264 y H.265.

Fuente: Elaboración propia.

Las fluctuaciones observadas en la calidad de 720p para las dos codificaciones de video indican que el incremento en el nivel de detalle de la imagen, la mejora en la fluidez del video y la nitidez de las sombras, características de una mayor calidad de video, conllevan a una saturación en la compresión y reconstrucción del video en el dispositivo receptor, por esta razón en el rango del 11% al 27% se presenta una curva negativa debido a que al inicio del video la imagen procesada suele tener más distorsión debido al ruido, la borrosidad o la compresión que se implica. Sin embargo, esta diferencia se va reduciendo a medida que avanza el video.

En la Fig. 22 y Fig. 23, se puede evidenciar las fluctuaciones en la transmisión de video en la calidad 720p para las codificaciones H.264 y H.265, respectivamente.



Fig. 22. Comportamiento del video a 720p codificación H.264.

Fuente: Elaboración propia.



Fig. 23 Comportamiento del video a 720p codificación H.265.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, la obtención de las métricas objetivas de QoE mediante la herramienta FFmpeg son congruentes con los resultados durante la visualización del video. Por ejemplo, en la Fig. 22 y Fig. 23, se observa como los errores de pixelación coinciden con los valores bajos de las tres métricas. En consecuencia, estas métricas proporcionan una evaluación objetiva de la QoE del video, siendo una elección pertinente puesto que elimina la necesidad de pruebas subjetivas que requieren encuestas y la participación directa de los usuarios.

4. CONCLUSIONES

La implementación de tecnologías de software libre como Mosaic5G y FlexRAN demostraron su robustez al crear una red móvil LTE-NSA completamente funcional. Esta red es capaz de satisfacer las demandas más exigentes en términos de ancho de banda, particularmente en servicios como el videostreaming. Además, se logra obtener métricas objetivas de QoE con resultados buenos teniendo en cuenta los valores para cada métrica, utilizando la herramienta de código abierto FFmpeg.

Estos avances destacan la viabilidad de construir una red LTE-NSA funcional utilizando recursos computacionales personales, lo que implica costos bajos y abre oportunidades para experimentación, investigación y educación en el campo de las comunicaciones móviles. Esta aproximación resulta especialmente relevante en entornos donde se busque explorar y comprender en profundidad el funcionamiento de estas tecnologías emergentes.

Se ha establecido un entorno de experimentación controlado donde tanto el servidor como el cliente son desplegados localmente, eliminando la

necesidad de utilizar un proxy para el acceso a redes externas. Esta configuración refleja una gestión efectiva de las solicitudes entre usuarios. Las características de este entorno posibilitan la obtención de métricas objetivas de QoE de referencia completa, ya que se cuenta con acceso tanto al video en el servidor como en el cliente.

Los resultados obtenidos de 30 dB para PSNR, aproximadamente 1 para SSIM y 70 para la métrica VMAF para las dos codificaciones H.264 y H.265 se encuentran dentro del rango bueno en cuanto a la QoE. Además, la herramienta FFmpeg ofrece la posibilidad de utilizar algoritmos matemáticos para su interpretación y visualización, lo que permite llevar un historial de los datos transmitidos y tomar decisiones sobre qué mejorar para futuras transmisiones.

Los resultados de las pruebas realizadas en el escenario experimental muestran la eficiencia tanto del codificador de video H.264 como para H.265. Estos hallazgos sugieren que, durante periodos de fluctuaciones en la red, es preferible elegir el segundo, ya que requiere la mitad del ancho de banda en comparación con los recursos radio necesarios para el primero.

En cuanto a trabajos futuros, se sugiere establecer lineamientos de estabilidad para evitar las fluctuaciones de red y aspirar a valores por encima de 80 en VMAF. Además, se propone investigar áreas como la Segmentación de Red (NS), handover y protocolos adaptativos para la transmisión de video.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad del Quindío por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

5. REFERENCIAS

- [1] A. N. Toosi, R. Mahmud, Q. Chi, and R. Buyya, "Management and orchestration of network slices in 5G, fog, edge, and clouds," *Fog and Edge Computing*. Wiley, pp. 79–101, Feb. 2019.
- [2] "More than 1 billion people will have access to 5G coverage by the end of 2020," *Ericsson.com*.
- [3] "2025, el ``boom'' del tráfico de datos móviles," *Consumotic*. Jun. 2020.
- [4] X. Liu, D. Fang, and P. Xu, "Automated Performance Benchmarking Platform of IaaS Cloud," in *Proceedings - 2021 IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, TrustCom 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 1402–1405. doi: 10.1109/TrustCom53373.2021.00197.
- [5] B. S. Lee, S. Yan, D. Ma, and G. Zhao, "Aggregating IaaS service," in *Proceedings - 2011 Annual SRII Global Conference, SRII 2011*, 2011, pp. 335–338. doi: 10.1109/SRII.2011.44.
- [6] V. Quizza-Hernández, J.-C. Arango-Colorado, and W.-Y. Campo-Muñoz, "Construction of a Video Transmission Scenario in Software-Defined Networks for QoE Estimation," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 31, no. 61, p. e14807, Sep. 2022, doi: 10.19053/01211129.v31.n61.2022.14807.
- [7] J. Ruan and D. Xie, "A Survey on QoE-Oriented VR Video Streaming: Some Research Issues and Challenges," *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 17, 2021, doi: 10.3390/electronics10172155.
- [8] J. Nightingale, P. Salva-Garcia, J. M. A. Calero, and Q. Wang, "5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 621–634, 2018, doi: 10.1109/TBC.2018.2816786.
- [9] J. Nightingale, P. Salva-Garcia, J. M. A. Calero, and Q. Wang, "5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 621–634, 2018, doi: 10.1109/TBC.2018.2816786.
- [10] "What is QoE (Quality of Experience) & QoE meaning?," *Axiros / The IoT & Device Management Company*.
- [11] H. F. Bermúdez-Orozco, W. Y. Campo-Muñoz, and E. Astaiza-Hoyos, "QoE estimation for different adaptive streaming techniques in mobile networks.," *Scientia et Technica*, vol. 26, no. 4, pp. 434–441, Dec. 2021, doi: 10.22517/23447214.24746.
- [12] D. Ghadiyaram, J. Pan, and A. C. Bovik, "A Subjective and Objective Study of Stalling Events in Mobile Streaming Videos," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 183–197, 2019, doi: 10.1109/TCSVT.2017.2768542.

- [13] “oai cn v2 · Wiki · mosaic5g / mosaic5g :,” *GitLab*.
- [14] Vã. Morles, “Sobre la metodologÃa como ciencia y el mÃ cientÃfico: un espacio polÃ ,” *Revista de PedagogÃa*, vol. 23, pp. 121–146, Mar. 2002, [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-97922002000100006&nrm=iso
- [15] I. PES Institute of Technology (Bangalore, IEEE Communications Society, IEEE Photonics Society. Bangalore Chapter, IEEE Robotics and Automation Society. Bangalore Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Detection in Sporadic Multiuser Systems over 3GPP LTE Networks*.
- [16] “Termux,” *F-droid.org*.
- [17] “RealVNC\textregistered{}: software de acceso remoto para escritorio y dispositivos móviles,” *RealVNC\textregistered{}*. Feb. 2022.
- [18] D. J. Luis, B. Valderrama, and N. G. Gomez, “Evaluación de metricas de QoS/QoE aplicadas a sistemas de iDTV.”
- [19] H. Welte, “sysmoUSIM / sysmoISIM User Manual,” 2016.
- [20] B. Xavier Paredes Calero and I. Darío Robayo, “Implementación de un HOTSPOT con servidor RADIUS en la Biblioteca de la Ciudad y la Provincia, ubicada en Ambato – Tungurahua,” 2010.
- [21] “H.265 vs H.264: Comparación entre H.265 y H.264,” *Videosolo.com*.
- [22] A. Horé and D. Ziou, “Image quality metrics: PSNR vs. SSIM,” in *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 2366–2369. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.
- [23] D. Tao, S. Di, X. Liang, Z. Chen, and F. Cappello, “Fixed-PSNR Lossy Compression for Scientific Data,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Cluster Computing, ICC*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., oct. 2018, pp. 314–318. doi: 10.1109/CLUSTER.2018.00048.
- [24] “Netflix Research,” *Netflix.com*.
- [25] X. Tong, C. Zhu, R. Xie, J. Xiong, and L. Song, “A VMAF directed perceptual rate distortion optimization for video coding,” in *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB*, IEEE Computer Society, oct. 2020. doi: 10.1109/BMSB49480.2020.9379915.
- [26] “MATLAB,” *Mathworks.com*.