

Construction of a functional mobile network based on Open RAN for Industry 4.0 applications

Construcción de una red móvil funcional basada en Open RAN para aplicaciones de la industria 4.0

Jhonny Atehortua-Ramos¹, Wilmar Yesid Campo-Muñoz², Gabriel Elías Chanchí-Golondrino³

¹MsC, Magister en Ingeniería de la Universidad del Quindío, Universidad del Quindío, Grupo de Investigación GITUQ, Armenia-Colombia 

jatehortuar@uqvirtual.edu.co

²PhD, Profesor de la Universidad del Quindío, Universidad del Quindío, Grupo de Investigación GITUQ, Armenia-Colombia 

wycampo@uniquindio.edu.co

³PhD, Profesor de la Universidad de Cartagena, Universidad de Cartagena, Grupo de Investigación DaToS, Cartagena de Indias-Colombia 

gchanchig@unicartagena.edu.co

Cite this article as: J. Atehortua-Ramos, W. Campo-Muñoz, G. Chanchí-Golondrino "Construction of a functional mobile network based on Open RAN for Industry 4.0 applications", *Prospectiva*, Vol. 24 N° 2 2026

Recibido: 11/09/2025 / Aceptado: 22/06/2026

RESUMEN

Uno de los principales objetivos de la industria 4.0 es la optimización de los diferentes procesos industriales mediante el aumento de la conectividad y la interoperabilidad de máquinas y sistemas, lo que permite una producción más eficiente y flexible, de tal modo que dentro de los principios de este enfoque se destacan: interoperabilidad, virtualización, descentralización, capacidad en tiempo real, orientación a servicios y modularidad. A nivel de las redes de comunicación de datos en la industria 4.0, es importante destacar que las aplicaciones industriales requieren comunicaciones con latencias muy bajas y alta confiabilidad para garantizar la seguridad y eficiencia operativa, de tal modo que las redes convencionales no permiten satisfacer estas demandas. De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se propuso como contribución la construcción de una red móvil funcional basada en Open RAN para aplicaciones de la industria 4.0. Para el desarrollo de la presente investigación, fueron definidas 4 fases metodológicas a saber: F1. Diseño y planificación de la arquitectura, F2. Implementación del núcleo de red, F3. Despliegue del RAN con OpenAirInterface y F4. Validación, Optimización y Casos de Uso. A nivel de los resultados, se diseñó e implementó la arquitectura de una red móvil basada en Open RAN mediante el uso de herramientas del código abierto, la cual fue especificada para servicios de streaming adaptativo MPEG-DASH. La arquitectura propuesta e implementada se verificó mediante un caso de estudio en donde se estimó la calidad de la experiencia en el consumo de videos tipo A y E usando la infraestructura extrema a extremo. La arquitectura propuesta, pretende servir de referencia para las universidades y empresas de cara a la implementación de servicios de la industria 4.0 mediante el enfoque de Open RAN.

Palabras clave: Industria 4.0, MPEG-DASH, Open RAN, red móvil, streaming adaptativo.

ABSTRACT

One of the main goals of Industry 4.0 is the optimization of different industrial processes by increasing the connectivity and interoperability of machines and systems, which allows for more efficient and flexible production. Thus, among the principles of this approach, the following stand out: interoperability, virtualization, decentralization, real-time capability, service orientation, and modularity. At the level of data communication networks in Industry 4.0, it is important to highlight that industrial applications require communications with very low latencies and high reliability to ensure safety and operational efficiency, so conventional networks do not allow these demands to be met. According to the above, this work proposed, as a contribution, the construction of a functional mobile network based on Open RAN for Industry 4.0 applications. For the development of the present research, four methodological phases were defined, namely: P1. Architecture design and planning, P2. Core network implementation, P3. RAN deployment with OpenAirInterface, and P4. Validation, Optimization, and Use Cases. In terms of results, the architecture of a mobile network based on Open RAN was designed and implemented using open-source tools, which was specified for MPEG-DASH adaptive streaming services. The proposed and implemented architecture was verified through a case study where the quality of experience was estimated in the consumption of videos types A and E using the end-to-end infrastructure. The proposed architecture aims to serve as a reference for universities and companies for the implementation of Industry 4.0 services through the Open RAN approach.

Keywords: Industry 4.0, MPEG-DASH, Open RAN, mobile network, adaptive streaming.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 representa la cuarta revolución industrial y se basa en la digitalización total de procesos, productos y servicios, conectando máquinas, sistemas y personas a través de redes inteligentes y plataformas digitales, de tal modo que integra tecnologías digitales avanzadas como: Internet de la Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), robótica, análisis de datos, realidad aumentada, entre otras, en los diferentes procesos productivos de las organizaciones [1], [2], [3]. Así mismo, dentro de los principios de la industria 4.0 se destacan: interoperabilidad, virtualización, descentralización, capacidad en tiempo real, orientación a servicios y modularidad [2]. Este enfoque tiene como objetivo principal la optimización de los procesos industriales mediante el aumento de la conectividad y la interoperabilidad de máquinas y sistemas, lo que permite una producción más eficiente y flexible [4].

Cabe destacar que la transición hacia la industria 4.0 implica no solo la adopción de tecnologías emergentes, sino también un cambio cultural y organizativo en las empresas, donde la gestión del cambio y la capacitación en nuevas habilidades son fundamentales para el éxito de la transformación digital [5]. En este sentido, la industria 4.0 representa un cambio drástico en la manera en que las industrias operan, ofreciendo mejoras significativas en eficiencia, sostenibilidad y oportunidades laborales, siempre y cuando se aborden adecuadamente los desafíos asociados con esta transformación [6].

Ahora bien a nivel de las redes de comunicación de datos en la industria 4.0, es importante destacar que las aplicaciones industriales, como robots móviles, sistemas de control en tiempo real y manufactura automatizada, requieren comunicaciones con latencias muy bajas y alta confiabilidad para garantizar la seguridad y eficiencia operativa [7], [8], [9], [10], [11]. En este mismo sentido, la conectividad en el contexto de la industria 4.0 debe adaptarse a diferentes necesidades, desde grandes volúmenes de datos hasta comunicaciones críticas de baja latencia, de tal modo que tecnologías como el "network slicing" en 5G permiten crear redes virtuales personalizadas para cada caso de uso industrial [9], [10]. Del mismo modo, los entornos industriales enmarcados en la industria 4.0 presentan flujos de datos con diferentes requisitos de calidad de servicio (QoS), lo que exige una gestión avanzada y segmentada de la red [12].

Sumado a los requisitos y exigencias de la industria 4.0, es importante resaltar que las redes industriales convencionales, al estar basadas principalmente en tecnologías cableadas y protocolos propietarios, presentan limitaciones significativas en cuanto a flexibilidad, escalabilidad y costos de actualización, de tal

modo que no están diseñadas para soportar la alta heterogeneidad, baja latencia, alta confiabilidad y adaptabilidad que requieren los entornos de Industria 4.0, donde los costos de instalación, mantenimiento y actualización, especialmente cuando se requiere adaptar la red a nuevas demandas o integrar dispositivos móviles [7], [13], [14]. Así mismo, es de resaltar que las redes tradicionales dificultan la reconfiguración rápida de líneas de producción y la integración de nuevos dispositivos, lo que limita la agilidad y la personalización que demanda la Industria 4.0 [15].

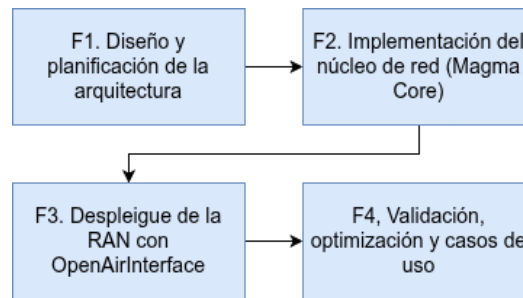
Teniendo en cuenta las limitaciones de las redes convencionales y las demandas exigidas por la industria 4.0, Open RAN se erige como una alternativa competitiva, al introducir una arquitectura desagregada, virtualizada y basada en software, con interfaces abiertas y estandarizadas, lo que permite flexibilidad, interoperabilidad entre múltiples proveedores y optimización programable mediante inteligencia artificial (IA) y machine learning (ML), las cuales son características clave para responder a los requisitos de la industria 4.0, como baja latencia, alta confiabilidad, escalabilidad y gestión eficiente de recursos en entornos industriales complejos [16], [17], [18], [19], [20], [21]. En este sentido, la desagregación y virtualización provista por Open RAN permiten a los operadores reducir tanto el gasto de capital (CapEx) como el operativo (OpEx), facilitando despliegues más económicos y eficientes, especialmente en regiones rurales o con baja densidad de usuarios [22], [23], [24], [25], [26]. A pesar de lo anterior, la estandarización y la integración de múltiples proveedores también requieren en Open RAN un mayor desarrollo para cumplir plenamente con los entornos industriales más exigentes [27].

En este artículo, se presenta una contribución significativa a la Industria 4.0 mediante la propuesta e implementación de una red móvil funcional basada en la arquitectura Open RAN y las ventajas de las tecnologías de código abierto. Así, el principal aporte de este trabajo se centra en la definición de una arquitectura abierta, optimizada para servicios de streaming adaptativo MPEG-DASH. La arquitectura propuesta fue evaluada, mediante un estudio de caso en donde se estimó la Calidad de la Experiencia (QoE) del usuario final al consumir dos tipos de videos (A y E) usando la infraestructura desplegada. De este modo, este trabajo sirve como un marco de referencia práctico, que demuestra la viabilidad de la arquitectura para aplicaciones de la Industria 4.0 que requieren una conectividad flexible, rentable y de alto rendimiento, permitiendo a empresas y organizaciones reducir costos de despliegue, disminuir la dependencia de proveedores propietarios y facilitar la adopción de soluciones de comunicación adaptadas a sus necesidades operativas. Del mismo modo, la arquitectura propuesta puede apoyar los procesos de transformación digital, entendidos como la integración estratégica de tecnologías digitales para optimizar procesos, mejorar la toma de decisiones basada en datos, incrementar la eficiencia operativa y promover nuevos modelos de negocio que fortalezcan la competitividad y capacidad de innovación de las organizaciones.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: En la sección 2 se presentan las fases metodológicas que guiaron el desarrollo de la presente investigación. En la sección 3 se describe el diseño e implementación de la arquitectura propuesta basada en Open RAN, así como un caso de estudio en el cual es evaluada la pertinencia de la red móvil implementada. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros derivados de la presente investigación.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación, fueron definidas 4 fases metodológicas a saber: F1. Diseño y planificación de la arquitectura, F2. Implementación del núcleo de red, F3. Despliegue del RAN con OpenAirInterface y F4. Validación, Optimización y Casos de Uso, las cuales se aprecian claramente en la Figura 1.

Figura 1. Metodología considerada. Fuente: Elaboración propia.

En la Fase 1 de la metodología, se llevó a cabo una definición detallada de los componentes de la arquitectura, la topología de la red y los requisitos técnicos que guiarían el despliegue. Así, en esta etapa se especificaron las herramientas de hardware y software necesarias para construir la infraestructura. Para la Red de Acceso de Radio (RAN), se seleccionó el software de código abierto OpenAirInterface (OAI), configurándolo como un eNB/gNB para habilitar la conectividad 4G y 5G. Paralelamente, el Core de la red se implementó utilizando la plataforma de código abierto Magma, que se compone del Access Gateway (AGW), responsable de las funciones de puerta de enlace, y el Orquestador, que administra y controla los nodos de la red. Para la implementación de la capa física de radio, se utilizó un dispositivo de radio definido por software (SDR) de alto rendimiento, el XRP USRP X300, que proporcionó la flexibilidad y capacidad de procesamiento necesarias para la experimentación y validación del prototipo. Lo anterior con el fin de dar soporte extremo a extremo a un servicio de video bajo demanda soportado mediante el protocolo de streaming adaptativo DASH.

Ahora bien, en la Fase 2: Implementación del Core de la red, se configuró la plataforma de código abierto Magma, la cual consta de dos componentes principales. Se implementó el Access Gateway (AGW) para consolidar las funciones del Core de red (MME, HSS, SGW y PGW) y gestionar las conexiones de la RAN y el tráfico de Internet. Por otra parte, se desplegó el Orquestador, una interfaz centralizada para la administración, monitorización y gestión de políticas y usuarios de toda la red.

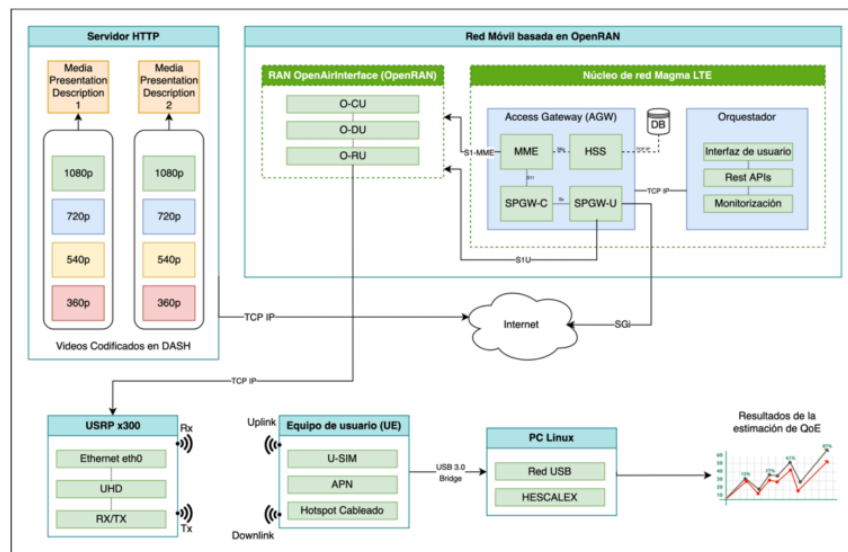
Por otra parte, en la Fase 3 de la metodología se implementó el software OpenAirInterface y su conectividad con el hardware de radio. Para ello, se utilizó el dispositivo de radio definido por software (SDR) XRP USRP X300, el cual funciona como la unidad de radio de la RAN y permite la conexión de los dispositivos de usuario. Se estableció la comunicación entre OpenAirInterface y el USRP X300 a través de una red Ethernet de 1000 Mbits/s, asegurando una correcta operación mediante la compatibilidad del controlador UHD.

Finalmente, en la Fase 4 de la metodología, se consolidaron todos los componentes de la arquitectura de red para llevar a cabo un estudio de caso experimental, haciendo uso de la herramienta de estimación HESCALEX para evaluar la Calidad de la Experiencia (QoE), la cual es una métrica clave para comprender la percepción del usuario final. El estudio se centró en el consumo de dos tipos de videos (identificados como A y E) que se encontraban alojados en un servidor HTTP. Para la transmisión de los videos, se empleó el protocolo de streaming adaptativo MPEG-DASH, que permite ajustar dinámicamente la calidad del video en función de las condiciones de la red. De este modo, en esta etapa final se validó el funcionamiento de la infraestructura y su pertinencia en el despliegue de la infraestructura en entornos académicos y empresariales. La selección de la QoE es pertinente dado que la arquitectura propuesta está orientada a soportar servicios de streaming adaptativo MPEG-DASH, cuyo desempeño depende no solo de métricas tradicionales de red, sino también de la experiencia percibida por el usuario. Por ello, la QoE permite evaluar de forma integral aspectos como la calidad visual, la fluidez de reproducción y la continuidad del servicio, ofreciendo una medida más representativa del desempeño de la arquitectura en escenarios reales.

3. RESULTADOS

Para lograr establecer la correcta implementación de la maqueta de experimentación, se debe en primera instancia definir la arquitectura de la maqueta en la que se incluyan todos los componentes necesarios. En esta, se deben especificar los recursos usados, como también la delimitación de la comunicación cliente-servidor, además es importante destacar como es el proceso de despliegue y configuración de cada uno de estos componentes, como se configuran y como se ejecutan dentro de un entorno abierto basado en Linux. De este modo, en la Figura 2, se muestra la arquitectura global de la maqueta de experimentación, en la cual se implementa un servidor HTTP que aloja dos videos en formato en MPEG-DASH en diferentes calidades. El servidor HTTP se conecta a internet con el fin de que el cliente, por medio del UE pueda consumir los videos en MPEG-DASH a través de la red del escenario de pruebas, cumpliendo de esta forma la comunicación cliente-servidor.

Figura 2. Arquitectura global de la maqueta de experimentación. Fuente: Elaboración propia.



Del mismo modo, también se establece la red móvil basada en Open RAN con sus respectivos componentes, tanto para RAN, como para el Núcleo de red (CN). Dentro de sus componentes se definen las dos herramientas usadas para la maqueta de experimentación llamadas OpenAirInterface para la RAN y Magma para el Core. OpenAirInterface es un Framework que contiene los módulos necesarios para la implementación de la RAN según los lineamientos definidos para Open RAN [28], donde cada componente se encuentra desagregado a nivel de software y es altamente personalizable en uso y configuración, de esta forma, permite trabajar con CN de diferentes fabricantes o desarrolladores, el único requisito es que las interfaces de conectividad se encuentren estandarizadas según la 3GPP [29]. Para el caso de la presente investigación, se decidió trabajar con un CN de otro desarrollador (Magma) con el fin de comprobar que el desarrollo Open RAN de OpenAirInterface se encuentra bastante robusto en términos de conectividad e implementación.

Magma es un desarrollo implementado por Facebook con el fin de reducir los costos y aumentar la flexibilidad de los operadores de servicios de comunicaciones, además de ayudarlos a reducir los huecos de cobertura en áreas rurales como urbanas. La implementación de Magma para esta maqueta de experimentación consta de 2 componentes principales llamados Access Gateway (AGW) y Orquestador. El AGW contiene elementos del CN-LTE como el MME, HSS, SGW y PGW, además de la conectividad a una base de datos que almacena toda la información de los suscriptores de la red, también define las interfaces SGi para su conectividad a internet y las interfaces S1-MME y S1U para la conectividad de la RAN, en este caso una Open RAN. El Orquestador, se encarga de definir una plataforma, con interfaz de usuario con el objetivo de centralizar todas las funciones de red implementadas a nivel de Core y RAN, también implementa funcionalidades de monitorización, gestión de políticas y usuarios. Ambos componentes se conectan a través de una red TCP-IP (Transmission Control Protocol – Internet

Protocol) [90]. Dentro de la arquitectura de Magma, también existe un tercer componente denominado “Federación Gateway” encargado de integrarse con las plataformas de los operadores de red móviles (MNO), no obstante, para la implementación de esta maqueta, no se dispone de este componente [30].

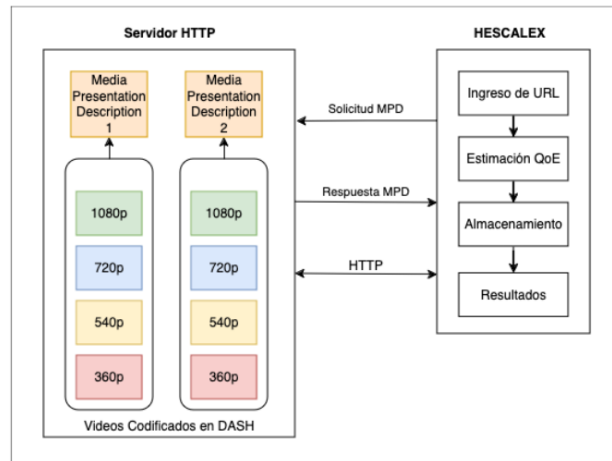
El software elegido para el montaje del servidor HTTP en el cual se implementa el servicio de streaming fue NGINX, el cual es un servidor web compatible con la entrega de contenido multimedia adaptativo a través de HTTP, lo que es esencial para la transmisión de video en formato MPEG-DASH, además ofrece soporte para la entrega de archivos estáticos, muy importante cuando se trabajan con archivos MPD y archivos de audio y video, además de contar con una amplia integración con FFmpeg (motor que se utiliza en HESCALEX) para entregar contenido estático para su transcodificación [31].

En este mismo sentido, uno de los componentes más importantes en esta arquitectura es la USRP, la cual corresponde a un dispositivo que permite implementar la unidad de radio de la RAN, y a través de ella el UE (User Equipment) podrá conectarse a la red móvil. La USRP usada para este montaje es la X300 de Ettus Research. Tomando en consideración sus especificaciones, este dispositivo se encuentra diseñado para aplicaciones de alto rendimiento, además de una interfaz Gigabit para aplicaciones que requieren un mayor ancho de banda, como es el caso de aplicaciones de videostreaming [32]. La comunicación de la RAN con la USRP X300, se hace a través de una red Ethernet, sin embargo, cabe mencionar que es necesario contar con el correcto controlador UHD, dado que la versión de este controlador debe ser compatible con la RAN de OpenAirInterface, además de estar conectada a una red con una velocidad mínima de 1000Mbps/s.

Para el montaje del UE, se debe de disponer de una USIM (Universal Subscriber Identity Module) previamente programada, como también una configuración de acceso APN (Access Point Name) que permitirá el ingreso del UE como un suscriptor a la red de la maqueta de experimentación. En el diseño de esta arquitectura, también se dispone de un equipo con sistema operativo Linux, el cual ejecuta la herramienta de estimación llamada HESCALEX, no obstante, para poder ingresar este equipo a la red de la maqueta de experimentación, el UE, debe de usar su opción de “USB Thetering” disponible en cualquier teléfono inteligente, con el fin de compartir la conectividad de la red a través de USB 3.0, creando un puente entre el equipo Linux y la red de datos móviles, de esta forma, cuando la herramienta consume los videos alojados en el servidor HTTP, esté usando como pasarela la red de la maqueta de experimentación. Finalmente, para ejecutar HESCALEX, solo es necesario de disponer de un equipo con puertos USB 3.0 y que tenga sistema operativo Linux.

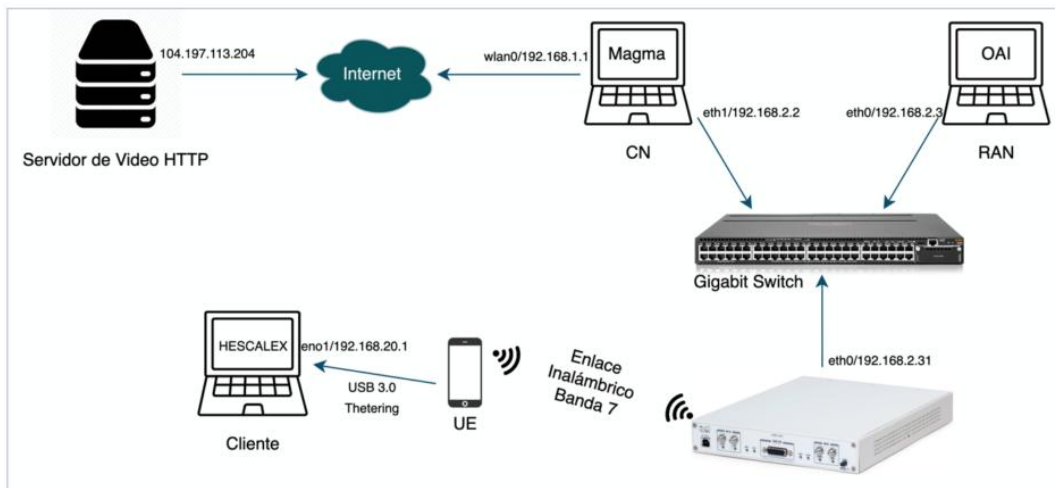
El objetivo de esta maqueta de experimentación es cumplir con el esquema cliente-servidor y para ello, desde el cliente se debe ingresar la URL de acceso al servidor HTTP (en este caso la IP del servidor) en donde se encuentren los archivos MPD de los videos, con el fin de consumir el video alojado en el servidor. En este procedimiento, cuando el cliente inicie el consumo de videostreaming adaptativo, la herramienta será capaz de realizar peticiones HTTP al servidor para obtener la información de los segmentos del video a través del MPD y así, estimar la QoE de manera automatizada de acuerdo con el tiempo y los segmentos que se elijan en su configuración, teniendo en cuenta las variaciones del ancho de banda de la red móvil basada en Open RAN, este procedimiento puede verse reflejado en la Figura 3.

Figura 3. Comunicación de HESCALEX con servidor HTTP. Fuente: Elaboración propia.



Por otra parte, en la Figura 4, es posible visualizar el diagrama de conectividad entre los elementos de la maqueta de experimentación, en donde son descritas las IP asignadas a las tarjetas de red de cada equipo.

Figura 4. Conectividad de componentes de la maqueta de experimentación. Fuente: Elaboración propia.



Del mismo modo, para el servidor de video HTTP, se asigna una dirección IP pública en una red externa, para que pueda ser alcanzada desde el cliente de la red móvil a través de internet. Es importante destacar que este servidor se aloja en una máquina virtual en la nube de AWS (Amazon Web Services) con el propósito de separar la red de la maqueta de experimentación y la red del servidor de video. Por su parte, para el computador de Magma fue necesario habilitar dos interfaces de red, una interfaz Gigabit Ethernet “eth0” para conectarse a la red 192.168.2.0 que es la red privada habilitada para la comunicación de la red móvil (Magma, OAI y USRP) y la interfaz “wlan0” que utiliza la interfaz SGi para la conexión del CN a internet. Toda la comunicación interna de los componentes se hizo a través de un switch Ethernet Gigabit, con el fin de asegurar un buen ancho de banda interno.

Por su parte, el UE se conecta a internet por medio del enlace inalámbrico creado por la USRP, el cual a través de 2 antenas modelo VERT2450 (una para TX y otra para RX), permite que el UE se conecte a la red móvil en banda 7 (2,6GHz) tanto para el enlace de subida (Uplink), como para el de bajada (Downlink). Existen dos formas de vincular el equipo que ejecuta HESCALEX a la red móvil. La primera es que el UE comparta su conexión de datos móviles a través de un Hotspot inalámbrico y la segunda a través de un Hotspot cableado por medio de USB. Para obtener mejores resultados y evitar

problemas de interferencias inalámbricas, la comunicación se hace por medio de un Hotspot cableado a través de un puerto USB 3.0, este enlace, crea una nueva red interna que se encuentra en el rango 192.168.20.0. Luego de definir la arquitectura y conectividad de los componentes de la maqueta de experimentación, en la Tabla 1, se listan los recursos de hardware y en la Tabla 2 se listan los recursos de software usados para el montaje.

Tabla 1. Herramientas hardware usadas para la maqueta de experimentación. Fuente: Elaboración propia.

Herramienta	Descripción
Servidor de video HTTP	AWS EC2 t2.small 1xCPU 2GB RAM 60GB SSD
PC 1 – Magma CN-LTE	Core i5 8250u 16GB RAM Ubuntu server 20.04
PC 2 – OAI - Open RAN	Core i7 4250u 12GB RAM Ubuntu Server 20.04
Gigabit Switch	Tp-link TL-SG1005d 5 puertos
USRP	Ettus Research X300
Antenas	VERT2450 (banda 7)
PC3 - HESCALEX	Core i5 4250u 8GB RAM Ubuntu Desktop 18.04
UE	Motorola G5 Plus / Samsung Galaxy S20 5G

Tabla 2. Herramientas software usadas para la maqueta de experimentación. Fuente: Elaboración propia.

Herramienta	Descripción
CN-LTE	Magma V1.6
OPEN RAN	OpenAirInterface 2020.w65
Servidor HTTP	Nginx (apt packet)
UHD	UHD v4.1
UE OS	Android 12
OS Kernel	5.13.0-40-lowlatency

En este mismo sentido, cabe mencionar que para lograr un correcto funcionamiento del Core Network de Magma, es fundamental habilitar los servicios específicos de la red móvil, los cuales son críticos para la gestión de suscriptores, la movilidad y la conectividad de datos. Esto, teniendo en cuenta que estos servicios se encuentran dispuestos en una máquina con sistema operativo Linux. De tal modo que, en la Figura 5, se observa el estado de algunos de los servicios del AGW de Magma. En total, en la instalación realizada se despliegan 13 servicios, como mme (gestión de movilidad), redis (almacenamiento de datos), subscriberdb (base de datos de suscriptores), dnssd (servidor DNS), magmad (servicio principal de Magma), mobilityd (gestión de la movilidad del usuario) y control_proxy (proxy de control), entre otros. La revisión del estado de cada uno de estos servicios es crucial para garantizar la integridad y la funcionalidad de la red privada, permitiendo detectar posibles errores de instalación. De este modo, en caso de existir problemas con alguno de estos servicios, es recomendable reiniciarlos.

Figura 5. Estado de algunos servicios del Magma AGW. Fuente: Elaboración propia.

```

● magma@sessiond.service - Magma session manager service
  Loaded: loaded (/etc/systemd/system/magma@sessiond.service; disabled; vendor preset: enabled)
  Active: active (running) since Sun 2024-04-28 20:21:21 -05; 9min ago
  Main PID: 632 (sessiond)
  Tasks: 10 (limit: 4915)
  Memory: 17.8M (limit: 300.0M)
  CGroup: /system.slice/system-magma.slice/magma@sessiond.service
          └─632 /usr/local/bin/sessiond

abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.202605 632 sessiond_main.cpp:312] Add localservice
abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.202617 632 sessiond_main.cpp:314] Add proxy service
abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.214283 1076 sessiond_main.cpp:288] Started SessionD restart handler thread
abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.219415 1080 sessiond_main.cpp:380] Started proxy service thread
abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.221319 1079 sessiond_main.cpp:375] Started local service thread
abr 28 20:21:27 magma sessiond[632]: I0428 20:21:27.221995 1001 sessiond_main.cpp:389] Started abort session service thread
abr 28 20:21:44 magma sessiond[632]: [/home/vagrant/magma/orc8r/gateway/c/common/config/ServiceConfigLoader.cpp:33] Override file not found for se
abr 28 20:21:44 magma sessiond[632]: I0428 20:21:44.329493 694 PolicyLoader.cpp:49] Connected to redis server
abr 28 20:22:00 magma sessiond[632]: I0428 20:22:00.360970 1079 LocalSessionManagerHandler.cpp:61] Pipelined has been restarted, attempting to sy
abr 28 20:22:00 magma sessiond[632]: I0428 20:22:00.363976 632 LocalSessionManagerHandler.cpp:193] Sending a setup call to PipelineD with epoch:

● magma@health.service - Magma health service
  Loaded: loaded (/etc/systemd/system/magma@health.service; disabled; vendor preset: enabled)
  Active: active (running) since Sun 2024-04-28 20:21:21 -05; 9min ago
  Main PID: 635 (python3)
  Tasks: 16 (limit: 4915)
  Memory: 28.7M (limit: 300.0M)
  CGroup: /system.slice/system-magma.slice/magma@health.service
          └─635 python3 -m magma.health.main

abr 28 20:21:21 magma systemd[1]: Started Magma health service.
abr 28 20:21:27 magma health[635]: WARNING:root:Service (health) missing in mconfig
abr 28 20:21:28 magma health[635]: INFO:root:Starting health...
abr 28 20:21:28 magma health[635]: INFO:root:Listening on address 127.0.0.1:50080

● magma@dnssd.service - Magma dnssd service
  Loaded: loaded (/etc/systemd/system/magma@dnssd.service; disabled; vendor preset: enabled)
  Active: active (running) since Sun 2024-04-28 20:21:27 -05; 9min ago
  Process: 640 ExecStartPre=/usr/bin/env python3 /usr/local/bin/generate_dnssd_config.py (code=exited, status=0/SUCCESS)
  Main PID: 1101 (dnsmasq)
  Tasks: 1 (limit: 4915)
  Memory: 1.2M (limit: 300.0M)
  CGroup: /system.slice/system-magma.slice/magma@dnssd.service
          └─1101 /usr/sbin/dnsmasq -k --conf-file=/var/opt/magma/tmp/dnssd.conf

lines 81-124

```

Para completar la configuración del Access Gateway (AGW) de Magma, no basta solamente con lanzar cada uno de los servicios previamente mencionados, sino que también es necesario realizar la conexión con el otro componente de Magma, es decir el Orquestador, el cual es el encargado de gobernar el funcionamiento del Core de Magma, de tal modo que corresponde a la interfaz gráfica a partir de la cual es posible modificar, configurar y parametrizar ciertas funcionalidades del Core. Así, para lograr esta conectividad, es necesario primero realizar un mapeo de interfaces, de tal modo que en el tablero de administración de AGW, al agregar una nueva Gateway, se deja la opción NAT en True y el resto de opciones por defecto dentro de la pestaña “Aggregation”. Luego de agregar estos parámetros se debe esperar a que el valor de “Health” del AGW pase a estado “Good” indicando que la conexión entre AGW y Orquestador se ha realizado de manera exitosa. Lo anterior, es posible verificarlo en los reportes del servicio “control_proxy” con una respuesta “200”, tal como se observa en la Figura 6.

Figura 6. Estado de algunos servicios del Magma AGW. Fuente: Elaboración propia.

```

service
  proxy.service; disabled; vendor preset: enabled)
  1:56 UTC; 3 days ago
  /usr/local/bin/generate_nhttpx_config.py (code=exited, status=0/SUCCESS)

control_proxy.service
  /nhttpx.conf
  /nhttpx.conf

15-13716:31:09.069Z [127.0.0.1 -> metricsd-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.MetricsController/Collect HTTP/2" 200 5bytes 0.038s
15-13716:31:09.069Z [127.0.0.1 -> metricsd-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.MetricsController/Collect HTTP/2" 200 5bytes 0.038s
15-13716:31:09.069Z [127.0.0.1 -> metricsd-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.MetricsController/Collect HTTP/2" 200 5bytes 0.042s
15-13716:31:09.069Z [127.0.0.1 -> metricsd-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.MetricsController/Collect HTTP/2" 200 5bytes 0.043s
15-13716:31:20.479Z [127.0.0.1 -> streamer-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.Streamer/GetUpdates HTTP/2" 200 2054bytes 0.022s
15-13716:31:20.479Z [127.0.0.1 -> streamer-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.Streamer/GetUpdates HTTP/2" 200 287bytes 0.019s
15-13716:31:41.716Z [127.0.0.1 -> streamer-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.Streamer/GetUpdates HTTP/2" 200 57bytes 0.013s
15-13716:31:41.716Z [127.0.0.1 -> streamer-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.Streamer/GetUpdates HTTP/2" 200 31bytes 0.012s
15-13716:31:41.716Z [127.0.0.1 -> streamer-controller.magma.test,8443] "POST /magma.orc8r.Streamer/GetUpdates HTTP/2" 200 7bytes 0.010s

```

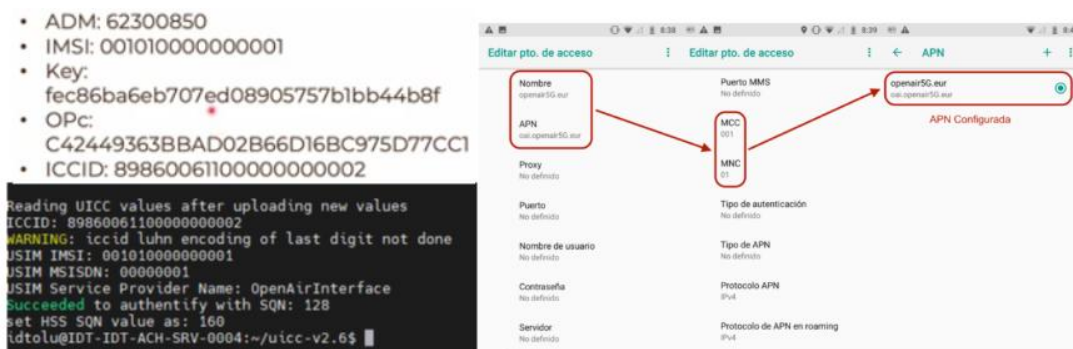
Por otra parte, para la implementación de la Open RAN de OpenAirInterface, se hizo uso de la USRP X300 presentada en la Figura 7, la cual actúa como el hardware de radiofrecuencia (RF). Este dispositivo es programado para funcionar como la estación base (eNB), permitiendo la comunicación e interacción con el software de OpenAirInterface. De este modo, la USRP X300 gestiona la capa física y la capa de radio (etapa radio), posibilitando que un dispositivo móvil se conecte y acceda a la red.

Figura 7. USRP empleada en la implementación de la Open RAN. Fuente: Elaboración propia.



Para lograr ingresar a la red móvil, es necesario disponer de un dispositivo móvil, el cual cuente con una simcard configurada con las llaves de acceso y los algoritmos de autenticación de la red para que el celular pueda acceder a esta. De este modo, el paso siguiente consiste en ingresar la USIM al UE y continuar con la configuración del APN. Para habilitar el APN en el UE, se ingresa a “configuración” y se selecciona la opción “Internet y Redes”, luego se selecciona “Red Móvil”, allí adentro se busca una opción que dice “Nombres de punto de servicio” y se da clic en “Agregar”. Dentro de este menú, se debe ingresar el nombre de la APN el cual es “openair5g.eur”, también el APN de la red móvil que corresponde a “oai.openair5g.eur” y se ingresan los parámetros MCC y MNC que corresponden a 001, 01 respectivamente, tal como se muestra en la Figura 8. En este mismo sentido, la USIM que porta el UE, debe ser programada con los parámetros que se encuentran alojados en la base de datos HSS del CN de la red móvil, tales como el MCC, MNC, IMSI (International Mobile Subscriber Identity), OPc (Operator key) y Key (Authentication Key). El IMSI hace referencia a la identificación única del UE y está compuesto por el PLMN y un número de identificación único de abonado móvil dentro de esa red, el OPc y el Key son usados para la autenticación del UE en la red móvil mediante un proceso criptográfico, ambos números se encuentran enlazados a un único IMSI y se encuentran almacenados tanto en el HSS como en la USIM. La programación de esta USIM se basó en la previa identificación de los parámetros que se encuentran almacenados en la base de datos del HSS, como también en la identificación de parámetros que se encuentran definidos por el fabricante de la USIM, tales como el ADM (Administrative key) y el ICCID (Integrated Circuit Card Identifier). El ADM es un código de acceso que permite ejecutar operaciones de escritura o lectura sobre la USIM, mientras que ICCID es la identificación única global del circuito integrado de la USIM. Con base en lo anterior, los parámetros que se deben programar en la USIM son presentados en la Figura 8.

Figura 8. Configuración de la APN. Fuente: Elaboración propia.



Al finalizar la configuración de la APN, el UE será capaz de registrarse en la red móvil cuando se haga la petición de registro, esto se puede hacer habilitando y desactivando el modo avión del UE para que el

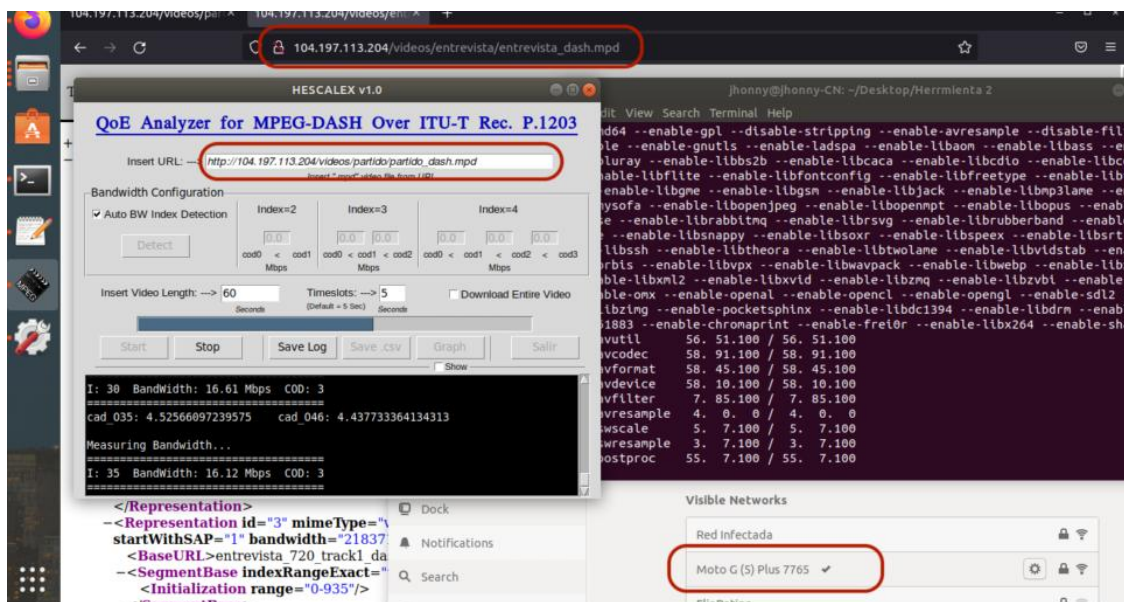
Attach se haga de manera efectiva a la red móvil de la maqueta de experimentación. En esta implementación no es necesario buscar la red móvil de manera manual desde el UE, ya que a causa de la calibración de la RAN, el UE es capaz de realizar el Attach de manera rápida. Lo anterior es apreciado en la Figura 9 donde se observa como la UE se encuentra enlazada con la red móvil configurada en la Figura 8 y consumiendo internet de manera adecuada.

Figura 9. Enlace de la UE con la red móvil. Fuente: Elaboración propia.



Para evaluar la conectividad móvil, se utilizó la herramienta HESCALEX, diseñada para el análisis de la Calidad de Experiencia (QoE) en la reproducción de videos. HESCALEX se ejecuta en el PC3 que accede a un servidor HTTP de streaming adaptativo usando como pasarela de datos la red con OpenRAN, lo que permite medir y caracterizar de manera objetiva el rendimiento de la red y la percepción del usuario durante el consumo de contenido multimedia (ver Figura 10). Esta metodología es fundamental para validar la funcionalidad y la eficiencia de la red privada móvil.

Figura 10. Despliegue de la herramienta de estimación de QoE - HESCALEX. Fuente: Elaboración propia.



Al ejecutar la herramienta HESCALEX se disponen de todas las funcionalidades implementadas durante

la fase de desarrollo del software, donde de manera inicial se ingresa la URL de un video en formato DASH, seguidamente se le indica a la herramienta si se desea trabajar con el ancho de banda definido en el MPD del video, o si se desea colocar límites de los anchos de banda para forzar la reproducción de un segmento de determinada calidad, las casillas para colocar estos valores de ancho de banda se habilitan de acuerdo al número de índices que tenga el video de manera automática. Si no se desea usar esta función, solo basta con no seleccionar la opción llamado “Auto BW Index Detection”. Luego de definir esta configuración, se procede a seleccionar el tiempo de estimación que se desea realizar al video como también la selección de los timeslots o “chunks”, por lo general el valor por defecto se encuentra definido en 5 segundos, esta configuración dependerá de los requerimientos de estimación del usuario que utilice este software. Cabe mencionar que para las pruebas de la herramienta en esta investigación, se definieron timeslots de 5 segundos. Finalmente, una vez inicializada la herramienta mediante el botón “Start”, el tiempo de ejecución va a depender del tiempo de estimación que se le indico a la herramienta. Luego de que termine el proceso de estimación es posible exportar los resultados mediante los botones “Save .csv”, “Graph” y “Save Log” si se desea que la graficas se muestren de manera automática se habilita la casilla “Show” que se encuentra debajo del botón “Graph”. Así El flujo de operación de la herramienta se resume en el siguiente procedimiento: 1. Agregar URL del video en formato DASH, 2. Dar clic en el botón “Detect”, 3. Seleccionar la opción “Auto BW Index Detection” o seleccionar límites de ancho de banda, 4. Indicar tiempo de estimación (total o parcial), 5. Indicar tiempo de los Timeslots, 6. Dar clic al botón “Start”.

Ahora bien con el fin de verificar la pertinencia y funcionalidad de la arquitectura de red implementada, se realizó la conducción de un estudio de caso en el que se integró la red móvil previamente implementada y la herramienta software de estimación HESCALEX. De este modo, en este caso de estudio, fue realizada la codificación de dos videos pertenecientes a diferentes categorías, es decir, se ha codificado uno tipo entrevista y otro tipo deportivo tomado de un partido de futbol. El objetivo de seleccionar estos videos es que el tipo de contenido de ambos difiere en su totalidad. Por ejemplo, el video de la entrevista posee un contenido limitado en detalle y movimiento de imágenes, cada trama es casi igual a la anterior generando poca movilidad, mientras que el video del partido de futbol posee un nivel de detalle más elevado, con un alto movimiento de cámara provocando que las tramas de cada fotograma sean muy diferentes con respecto a la trama anterior. Lo anterior, hace que estos videos sean idóneos para generar resultados interesantes de estimación por medio de la herramienta HESCALEX. En este mismo sentido, según la recomendación ITU-T P.910, la clasificación de estos videos se divide en categoría A para el correspondiente a la entrevista y en categoría E para el del partido de futbol.

La codificación de estos videos se ha dividido en diferentes calidades para lograr ajustarse con los requerimientos del formato MPEG-DASH, de tal modo que cada video tiene diferentes calidades de video tales como: 360p, 540p, 720p y 1080p. Así mismo en la Tabla 3 se definen el resto de los parámetros de codificación de cada video utilizado para esta implementación de estudio de caso. Cabe destacar que ambos videos usan la misma parametrización para su codificación, con el objetivo de identificar que el tipo de video también influye en la estimación de la QoE. De acuerdo con lo anterior, la ITU P.1203 establece la variable O.35 para la puntuación final de calidad de la codificación audiovisual, donde O.35 es primordial para la estimación total de la QoE del video. En este sentido, en la Tabla 3 son presentados los parámetros de codificación usados para los videos de las categorías A y E empleados en el caso de estudio, los cuales como se mencionó previamente, han sido codificados en 4 calidades a partir de los requerimientos de MPEG-DASH.

Tabla 3. Herramientas hardware usadas para la maqueta de experimentación. Source: Elaboración propia.

Parámetros	Videos Categorías A y E			
Resolución	1080p	720p	540p	360p
Bitrate	9Mbps	4Mbps	2Mbps	1Mbps
Max Rate	9Mbps	4Mbps	2Mbps	1Mbps

Buffer Size	1500Kbps	1000Kbps	500Kbps	400Kbps
-------------	----------	----------	---------	---------

Del mismo modo, en la Figura 11, se presenta la arquitectura de implementación del estudio de caso, en donde se muestran los diferentes componentes de la misma que permiten el consumo de los videos desde el servidor HTTP mediante streaming adaptativo, destacándose que en este caso se tomó como distancia arbitraria del UE con la estación base 7m.

Figura 11. Escenario del caso de estudio definido. Fuente: Elaboración propia.



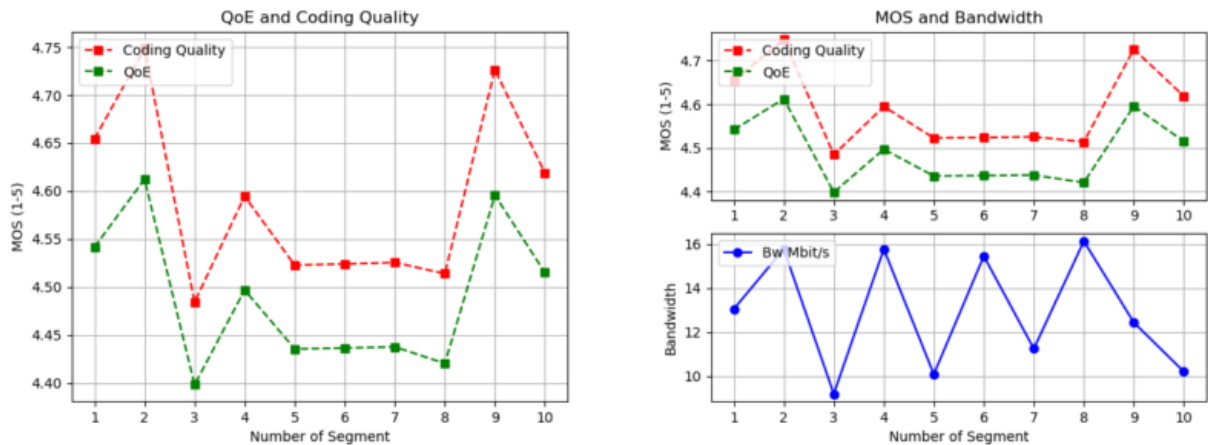
Una vez definido el escenario del caso de estudio, se realizó la estimación de la QoE sobre el video de categoría E, evidenciando que las fluctuaciones de red tienen un alto impacto en el consumo de un archivo multimedia, como se observa en la Tabla 4, donde se tomaron 10 segmentos de video, dentro de los cuales cada uno corresponde a un timeslot de 5 segundos, dando en total un análisis de 50 segundos. Cada segmento de video analizado consta de cuatro variables, como la calidad de la codificación, la puntuación de QoE, el ancho de banda en el momento en que se realizó el consumo del video y el índice de codificación. Teniendo en cuenta que la selección del ancho de banda se seleccionó en automático y el UE se encontraba a una distancia de 7 metros con respecto a la estación base.

Tabla 4. Resultados del caso de estudio para el video categoría E. Fuente: Propia.

Segment	Coding Quality	QoE	Bandwith (Mbps)	Index Coding
1	4,654	4,542	13,05	3
2	4,749	4,612	15,77	3
3	4,484	4,398	9,2	3
4	4,595	4,497	15,77	3
5	4,523	4,436	10,09	3
6	4,524	4,436	15,45	3
7	4,526	4,438	11,25	3
8	4,514	4,421	16,13	3
9	4,726	4,596	12,44	3
10	4,619	4,515	10,21	3

Así mismo a partir de la Figura 12, es posible evidenciar que las fluctuaciones que tiene la red móvil de la maqueta de experimentación son bastante elevadas, teniendo un ancho de banda que va desde los 9.2Mbps para el segmento 3, hasta los 16.13Mbps del segmento 8. Es importante destacar que, si bien las fluctuaciones de la red pueden llegar a generar afectaciones en la estimación de la QoE, para este video, el ancho de banda sigue estando alto para los niveles de codificación del video categoría E, lo que se evidencia en la columna del índice de codificación (Index Coding) de la Tabla 4, en donde para todos los segmentos analizados, HESCALEX trabajo con la codificación más alta que es 3, siendo la codificación 0 la más baja de todas.

Figura 12. Estimación realizada al video categoría E. Fuente: Elaboración propia.



Durante este análisis, la herramienta ha trabajado con un índice de codificación constante de 3 para todos los segmentos de video, siendo esta la codificación más alta de las 4 disponibles para el video, no obstante, el valor del MOS no es el mismo en los segmentos que usan la misma codificación de video, ya que por lo general, existen variaciones que no solo dependen de la resolución o codificación del video, sino también de factores externos como retardos, generados por inestabilidad de la red, efectos de estancamiento, por ejemplo, para el segmento 3, la velocidad de la red ha disminuido provocando una leve caída en el MOS de la QoE de 4.3 con una calidad de codificación de 4.4. Se observa que para el segmento 2, la QoE fue la más alta con un valor MOS de 4.6 a un ancho de banda de 15.77Mbps. Pero, para el segmento 4 que también tuvo el mismo ancho de banda, la QoE tuvo un MOS de 4.4, esta disminución se debe a que existe una correlación directa entre la calidad de codificación y la QoE, los segmentos con mayor calidad de codificación tienden a tener una QoE más alta, lo cual es esperable.

Así, según los resultados de esta primera estimación, la variación del ancho de banda no afectó significativamente la estimación de la QoE del video, posicionándose en un valor MOS total promedio de 4.4, debido a que, si bien la velocidad de la red oscilaba bastante, el ancho de banda seguía estando alto para los niveles de codificación del video. Es aquí donde se destaca la importancia de la funcionalidad de ancho de banda manual de HESCALEX, a raíz de esta función, es posible obtener los segmentos deseados del video DASH. Por otra parte, en lo que respecta a la segunda estimación la herramienta analiza el video de categoría A, con una distancia de 7 metros entre el UE y la estación base, se obtiene que de igual forma están presentes oscilaciones en el ancho de banda de la red, como se observa en la Tabla 5, en donde se presenta el análisis de 10 segmentos de video, cada uno con un timeslot de 5 segundos, teniendo un tiempo de análisis total por 50 segundos. Las variaciones del ancho de banda van desde los 5.6Mbps del segmento 2, hasta los 16.29Mbps del segmento 3, una fluctuación mucho mayor con respecto a la de la primera estimación.

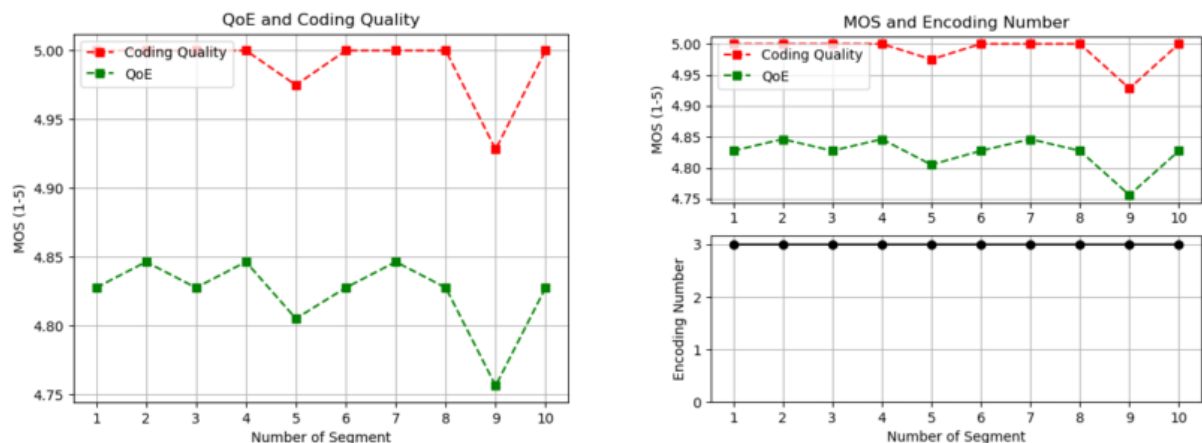
Tabla 5. Resultados del caso de estudio para el video categoría A. Fuente: Elaboración propia.

Segment	Coding Quality	QoE	Bandwith (Mbps)	Index Coding
1	5,0	4,828	14,93	3
2	5,0	4,846	5,6	3
3	5,0	4,828	16,29	3
4	5,0	4,846	15,9	3
5	4,975	4,805	15,84	3
6	5,0	4,828	16,05	3
7	5,0	4,846	16,6	3
8	5,0	4,828	15,98	3
9	4,928	4,756	15,87	3
10	5,0	4,828	16,14	3

<https://orcid.org/0000-0002-3854-2636> Según la Figura 13, es posible evidenciar que la calidad de la

codificación es más alta, ya que 8 de los 10 segmentos analizados, poseen una puntuación MOS de 5.0, lo que conlleva a tener una puntuación MOS de QoE mucho más alta, posicionándose en un valor MOS total promedio de 4.8. Al igual que en la estimación anterior, la herramienta utilizó el índice de codificación más alto. Esto se debe a que, incluso con el valor de ancho de banda más bajo (5.6Mbps), este es suficiente para los parámetros de codificación utilizados en este video, demostrando que las variaciones del ancho de banda, para esta estimación, no generaron mayor afectación a la puntuación MOS de la QoE final, así mismo, se concluye que para los segmentos 5 y 9 hubo una disminución en la calidad de codificación, afectando directamente la puntuación MOS de la QoE. Esta disminución de la calidad de codificación puede verse afectada por factores como las características del contenido del video, limitaciones de recursos en el sistema de transmisión como capacidad de procesamiento, algoritmos de compresión usados por FFMPEG o condiciones de retardos o estancamientos en la red.

Figura 13. Estimación realizada al video categoría A. Fuente: Elaboración propia.



Con los resultados de esta segunda estimación se puede afirmar que, los videos de categoría A, mantienen una calidad de codificación y de QoE mucho más alta que los videos de categoría E, incluso con anchos de banda más bajos, esto, debido a que son videos que poseen menos movimiento y son muchos más estables en términos de codificación y compresión. Así mismo, se pudo comprobar la pertinencia del entorno de experimentación implementado, de tal modo que puede ser fácilmente replicado o extrapolado para la experimentación con redes móviles, dadas las ventajas de las herramientas libres y de código abierto empleadas.

4. Conclusiones y Trabajos Futuros

La arquitectura basada en Open RAN propuesta en este trabajo no solo permite la replicación de redes móviles en entornos controlados, como laboratorios de investigación, sino que también facilita su extrapolación a escenarios del mundo real en países en vías de desarrollo. A diferencia de las soluciones cerradas, la flexibilidad y el menor costo de la arquitectura Open RAN permiten a las empresas y centros de investigación adaptar la infraestructura de red a las necesidades específicas de la población y el entorno local. Esto significa que se puede escalar la red para cubrir zonas rurales con baja densidad de población o configurar una infraestructura para aplicaciones industriales especializadas, todo ello con una inversión más accesible y con un mayor control sobre los componentes de la red.

La arquitectura de red desagregada, diseñada e implementada en este trabajo, representa una innovación estratégica al romper con los sistemas monolíticos y propietarios convencionales. Así, esta separación de hardware y software no solo maximiza la flexibilidad al permitir la integración de componentes de múltiples proveedores, sino que también fomenta la interoperabilidad, abriendo la puerta al desarrollo de redes privadas 5G personalizables y de bajo costo. Este enfoque habilita a las empresas y centros de investigación a construir infraestructuras de telecomunicaciones a medida, optimizando el rendimiento para requisitos específicos y reduciendo la dependencia de proveedores tradicionales, lo que en última

instancia democratiza el acceso a la tecnología 5G para una variedad de aplicaciones y entornos.

La arquitectura de red privada, diseñada e implementada en este trabajo, demostró ser una solución robusta y estratégica para entornos críticos que exigen conectividad avanzada. De este modo, al facilitar esta arquitectura la integración de dispositivos como robots autónomos, sensores industriales y cámaras con IA, esta infraestructura satisface de manera efectiva los requisitos de baja latencia, alta confiabilidad y movilidad controlada. Este enfoque no solo optimiza la operación de casos de uso complejos en plantas remotas o áreas sin cobertura comercial, sino que también ofrece una plataforma de comunicación independiente y adaptable, permitiendo el despliegue de tecnología de vanguardia en localizaciones geográficas y entornos industriales donde las redes convencionales no son viables.

La arquitectura de red móvil privada implementada en este trabajo, basada en la filosofía Open RAN y herramientas de código abierto como OpenAirInterface y Magma, constituye una solución estratégica para la digitalización industrial. Al tratarse de una arquitectura libre, su diseño no solo facilita la fácil extrapolación y adaptación a diversos escenarios, sino que también otorga a las empresas una autonomía sin precedentes para desplegar redes que se ajusten a sus necesidades específicas de la Industria 4.0. De este modo, a pesar de los desafíos técnicos inherentes, los beneficios en términos de control sobre la infraestructura, reducción de costos y fomento de la innovación justifican su implementación, posicionándola como una alternativa viable y competitiva frente a las soluciones propietarias. Asimismo, la arquitectura propuesta puede contribuir a los procesos de transformación digital de las organizaciones, al proporcionar una plataforma de comunicaciones flexible y de alto rendimiento que favorece la optimización de procesos, la integración de tecnologías emergentes y el fortalecimiento de la competitividad empresarial.

Como continuación de este trabajo, se propone una línea de investigación futura centrada en la evaluación exhaustiva de la calidad de la experiencia (QoE) y la calidad del servicio (QoS) para una gama más amplia de servicios de video. De este modo, aunque este estudio sentó las bases de la infraestructura, es imperativo adaptar la arquitectura propuesta para soportar y analizar el rendimiento de aplicaciones de video en tiempo real, como la transmisión en vivo (live streaming).

Agradecimientos

A la Universidad del Quindío por su apoyo en la ejecución de esta investigación a través del proyecto 1160 de la Vicerrectoría de Investigaciones y a la Universidad de Cartagena por el apoyo brindado en el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- [1] L. D. Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [2] E. Oztemel and S. Gursev, "Literature review of Industry 4.0 and related technologies," *J Intell Manuf*, vol. 31, no. 1, pp. 127–182, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10845-018-1433-8.
- [3] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006.
- [4] C. Chen Cheng, E. Chung, and N. Correa, "Inteligencia Artificial y su Impacto en la Industria de la Ingeniería," *REICT*, vol. 3, no. 1, pp. 26–40, Jul. 2023, doi: 10.48204/reict.v3n1.3948.
- [5] R. Jimenez Leon, D. E. Magaña Medina, and S. P. Aquino Zúñiga, "Gestión de tendencias STEM en educación superior y su impacto en la industria 4.0," *JOA*, no. 5, pp. 99–121, Aug. 2021, doi: 10.47058/joa5.7.
- [6] F. A. Ramos Zaga, "Implicancias transformadoras de la Cuarta Revolución Industrial en el mercado laboral," *NBR*, vol. 9, no. 2, pp. 40–71, Dec. 2023, doi: 10.22451/3002.nbr2023.vol9.2.10087.
- [7] M. Gundall *et al.*, "Introduction of a 5G-Enabled Architecture for the Realization of Industry 4.0 Use

- Cases," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 25508–25521, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057675.
- [8] E. J. Khatib and R. Barco, "Optimization of 5G Networks for Smart Logistics," *Energies*, vol. 14, no. 6, p. 1758, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061758.
 - [9] T. Taleb, I. Afolabi, and M. Bagaa, "Orchestrating 5G Network Slices to Support Industrial Internet and to Shape Next-Generation Smart Factories," *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 146–154, Jul. 2019, doi: 10.1109/MNET.2018.1800129.
 - [10] A. E. Kalor, R. Guillaume, J. J. Nielsen, A. Mueller, and P. Popovski, "Network Slicing in Industry 4.0 Applications: Abstraction Methods and End-to-End Analysis," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 14, no. 12, pp. 5419–5427, Dec. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2839721.
 - [11] A. Varghese and D. Tandur, "Wireless requirements and challenges in Industry 4.0," in *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, Mysore, India: IEEE, Nov. 2014, pp. 634–638. doi: 10.1109/IC3I.2014.7019732.
 - [12] K. Gold, K. Wallstedt, J. Vikberg, and J. Sachs, "Connectivity for Industry 4.0," in *Industry 4.0 and Engineering for a Sustainable Future*, M. Dastbaz and P. Cochrane, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 23–47. doi: 10.1007/978-3-030-12953-8_3.
 - [13] R. Sabella, P. Iovanna, G. Bottari, and F. Cavaliere, "Optical transport for Industry 4.0 [Invited]," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 12, no. 8, p. 264, Aug. 2020, doi: 10.1364/JOCN.390701.
 - [14] T.-A. Tran, T. Ruppert, G. Eigner, and J. Abonyi, "Retrofitting-Based Development of Brownfield Industry 4.0 and Industry 5.0 Solutions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64348–64374, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182491.
 - [15] A. Moeuf, R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo, and R. Barbaray, "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 3, pp. 1118–1136, Feb. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1372647.
 - [16] A. Arnaz, J. Lipman, M. Abolhasan, and M. Hiltunen, "Toward Integrating Intelligence and Programmability in Open Radio Access Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 67747–67770, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3183989.
 - [17] M. Polese *et al.*, "Empowering the 6G Cellular Architecture With Open RAN," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 42, no. 2, pp. 245–262, 2024, doi: 10.1109/JSAC.2023.3334610.
 - [18] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni, and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3239220.
 - [19] A. S. Abdalla, P. S. Upadhyaya, V. K. Shah, and V. Marojevic, "Toward Next Generation Open Radio Access Networks: What O-RAN Can and Cannot Do!," *IEEE Network*, vol. 36, no. 6, pp. 206–213, 2022, doi: 10.1109/MNET.108.2100659.
 - [20] S. Marinova and A. Leon-Garcia, "Intelligent O-RAN Beyond 5G: Architecture, Use Cases, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 27088–27114, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367289.
 - [21] M. Wani, M. Kretschmer, B. Schröder, A. Grebe, and M. Rademacher, "Open RAN: A Concise Overview," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 13–28, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3430823.
 - [22] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni, and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3239220.
 - [23] M. Polese *et al.*, "Empowering the 6G Cellular Architecture With Open RAN," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 42, no. 2, pp. 245–262, 2024, doi: 10.1109/JSAC.2023.3334610.
 - [24] D. Wypiór, M. Klinkowski, and I. Michalski, "Open RAN—Radio Access Network Evolution, Benefits and Market Trends," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, p. 408, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12010408.
 - [25] M. Karbalaee Motalleb, V. Shah-Mansouri, S. Parsaeefard, and O. L. Alcaraz López, "Resource Allocation in an Open RAN System Using Network Slicing," *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, vol. 20, no. 1, pp. 471–485, 2023, doi: 10.1109/TNSM.2022.3205415.
 - [26] X. Liang, Q. Wang, A. Al-Tahmeesschi, S. B. Chetty, D. Grace, and H. Ahmadi, "Energy Consumption of Machine Learning Enhanced Open RAN: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 81889–81910, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3412758.
 - [27] W. Azariah, F. A. Bimo, C.-W. Lin, R.-G. Cheng, N. Nikaein, and R. Jana, "A Survey on Open Radio Access Networks: Challenges, Research Directions, and Open Source Approaches," *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 1038, Feb. 2024, doi: 10.3390/s24031038.
 - [28] F. Kaltenberger and Eurecom, "Open Air Interface is O-RAN ready," *Networking Channel*, 2021, [Online]. Available: <https://networkingchannel.eu/wp-content/uploads/2021/04/Open-RAN-and->

- OpenAirInterface-%E2%80%93the-perfect-couple.pdf
- [29] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639–127651, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939938.
 - [30] "Magma Core | Learn The Technology." [Online]. Available: <https://magmacore.org/learn-the-technology/>
 - [31] "NGINX MANAGEMENT TECH SPECS." [Online]. Available: <https://docs.nginx.com/nginx-management-suite/tech-specs/>
 - [32] Ettus Research, "USRP x300/x310 Overview - Native Instruments." [Online]. Available: <https://kb.ettus.com/X300/X310>