

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL SERVICIO DE STREAMING DE VIDEO EN VIVO, DURANTE UN PROCESO DE TELE-CIRUGÍA USANDO CÁMARAS DE 360 GRADOS.



**Javier Eduardo Rosas Ibarra
Valentina Muñoz Mayor**

Director: PhD. Ing. José Luis Arciniegas Herrera

Co-Director: PhD. Ing. Héctor Fabio Bermudez Orozco

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telemática

Universidad del Cauca

2022

Tabla de Contenido

Introducción	1
Motivación	1
Objetivos	2
General	2
Específicos	2
Marcos de Referencia	3
Marco Teórico	3
Streaming de Vídeo	3
Redes 5G	5
Video 360	10
Calidad de la Experiencia - QoE	11
Simuladores de Red	13
Marco de Antecedentes	13
Brechas	24
Construcción del Escenario	28
Diseño del Escenario	28
Implementación del Escenario	30
Configuración del simulador	30
Verificación de los puntos umbrales	34
Parámetros	34
Bitrate y codificación	35
Frecuencia	36
Numerología	38
Ancho de banda	39
Codificación y Modulación Adaptativa (ACM)	40
Modificación a los archivos de configuración de Simu5G	41
Pruebas	43

Medición de la Calidad de la Experiencia–QoE Subjetiva	55
Determinación de las condiciones mínimas	57
Resultados QoE	57
Interpretación y análisis de los resultados	63
Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros	65
Conclusiones	65
Recomendaciones	66
Trabajos futuros	67
Bibliografía	77
Anexos	78
Anexo A. Resumen de las experiencias vividas en el proyecto	79
Anexo B. Configuración de Simu 5G	87
Anexo C. Configuración de Wowza	94
Anexo D. Configuración de OBS	97
Anexo E. Experimento de calidad de video	99
Anexo F. Artículo	101

Índice de figuras

1.	Funcionamiento del Buffer	4
2.	Arquitectura del plano de datos de una red celular 5G	6
3.	Clasificaciones de espectro en 5G	7
4.	Escenarios de la tecnología 5G	8
5.	Diagrama de contexto	29
6.	Diseño simulación en Simu5G	31
7.	Prueba de funcionamiento de la simulación	33
8.	Estructura de marco en NR	38
9.	Codificación y Modulación Adaptativa	41
10.	Archivo de configuración inicial omnetpp.ini de la carpeta extclientserver .	42
11.	Archivo de configuración modificado omnetpp.ini de la carpeta extclientserver	42
12.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 3000 kbps y $u = 2$	48
13.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 3000 kbps y $u = 3$	48
14.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 5000 kbps y $u = 2$	49
15.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 5000 kbps y $u = 3$	49
16.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 9000 kbps y $u = 2$	50
17.	Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 9000 kbps y $u = 3$	50
18.	Resultado con Frecuencia de 42 GHz, u de 3 y bitrate de 3000 kbps	51
19.	Resultado con Frecuencia de 42 GHz, u de 3 y bitrate de 5000 kbps	52
20.	Resultado con Frecuencia de 42 GHz, u de 3 y bitrate de 9000 kbps	52
21.	Error en Wireshark con RTMP en el servidor	53
22.	Error en Wireshark con RTMP en el cliente	53
23.	Error en Wireshark bitrate de 15000 kbps	54
24.	Diagrama de presentación de secuencias ITU-T P.913	55
25.	Evaluación de QoE para diferentes bitrates	59
26.	Gráfica de pérdida de paquetes	60
27.	Gráfica de Throughput	61
28.	Gráfica de Retraso entre paquetes	61
29.	Gráfica de Jitter	62

A.1. Error IDE	80
A.2. Creación de las redes virtuales	81
A.3. Emulación corriendo mediante el IDE de OMNeT++	81
A.4. Tipos de configuración por IDE	82
A.5. Respuesta de Giovanni Nardini	83
A.6. Visualización del error ejecutado por la terminal	83
A.7. Segunda respuesta de Giovanni Nardini	85
B.1. Comando para descomprimir OMNeT++ v6.0	87
B.2. Comando para listar el contenido del directorio omnetpp-6.0pre11	88
B.3. Comando para ejecutar el entorno omnetpp-6.0pre11	88
B.4. Evidencia del path agregado	89
B.5. Evidencia de configuración exitosa del path	90
B.6. Evidencia de instalación exitosa de Omnetpp	90
B.7. Comandos para la instalación de inet	91
B.8. Comandos para la instalación de Simu5G	91
B.9. Configuración para enviar/recibir paquetes	91
B.10. Importar proyectos al IDE de Omnet	92
B.11. Seleccionar Existing Projects into Workspace	92
B.12. Importar la dirección del directorio Inet4.3	93
C.1. Página inicial del servidor wowza	94
C.2. Crear nueva aplicación en Wowza	95
C.3. Autenticación de origen Wowza	95
C.4. Configuración de conexión Wowza	96
D.1. Configuración en OBS parte 1	97
D.2. Configuración en OBS parte 2	98

Índice de tablas

1.	Aportes y brechas	27
2.	Características del PC utilizado	32
3.	Tasas de bits recomendadas para OBS Studio	35
4.	Frecuencia y Ancho de banda del canal NR	37
5.	Bandas operativas NR en FR2	37
6.	Numerologías múltiples en NR	39
7.	Configuración de ancho de banda máximo de transmisión NRB para FR2	39
8.	Anchos de banda de canal para cada banda NR para FR2	40
9.	Restricciones del Escenario	44
10.	Resultados con bitrate 3000 kbps, $\mathbf{u} = 2$, SCS = 60.	45
11.	Resultados con bitrate 3000 kbps, $\mathbf{u} = 3$, SCS = 120.	45
12.	Resultados con bitrate 5000 kbps, $\mathbf{u} = 2$, SCS = 60.	46
13.	Resultados con bitrate 5000 kbps, $\mathbf{u} = 3$, SCS = 120.	46
14.	Resultados con bitrate 9000 kbps, $\mathbf{u} = 2$, SCS = 60.	47
15.	Resultados con bitrate 9000 kbps, $\mathbf{u} = 3$, SCS = 120.	47
16.	Resultados cuestionarios de QoE	59
E.1.	Prueba de la evaluación Subjetiva (ACR) – MOS	100

Índice de siglas

- 3GPP** Proyecto Asociación de Tercera Generación - 3rd Generation Partnership Project
- ACM** Codificación y Modulación Adaptativa - Adaptive Modulation and Coding
- ACR** Índice por categorías absolutas - Absolute Category Rating
- AR** Realidad Aumentada - Augmented reality
- BS** Estación Base - Base Station
- CA** Agregación de portadores - Carrier Aggregation
- CC** Portadores de componentes - Component Carrier
- CN** Red Central - Core Network
- DASH** Transmisión de Vídeo Adaptable Dinámica a través de HTTP - Dynamic Adaptive Streaming over HTTP
- DL** Relación de Enlace Descendente - Downlink ratio
- eMBB** Banda Ancha Móvil Mejorada - Enhanced Mobile Broadband
- FDD** Duplexación por División de Frecuencia - Frequency Division Duplex
- FPS** Cuadros por Segundo - Frames per Second
- HD** Alta Definición - High Definition
- IOT** Internet de las Cosas - Internet of Things
- ITU** Unión Internacional de Telecomunicaciones - International Telecommunication Union
- KPI** Indicadores Clave de Rendimiento - Key Performance Indicators
- LVS** Transmisión de Video en Vivo - Live Video Streaming
- METIS** Habilitadores de comunicaciones móviles e inalámbricas para la Veinte Veinte - Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty

mMTC Comunicaciones Masivas de Tipo de Máquina - Massive Machine Type Communications

MOS Puntuación de Opinión Media - Average Opinion Score

MR Realidad Mixta - Mixed Reality

MTD Dispositivos de tipo de máquina - Machine Type Device

NAT Traducción de Direcciones de Red - Network Address Translation

NR Nueva Tecnología de Acceso de Radio - New Radio

PER Tasa de Errores de Paquetes - Packet Error Rate

QoE Calidad de la Experiencia - Quality of Experience

QoS Calidad del Servicio - Quality of Service

QUIC Conexiones UDP rápidas en Internet - Quick UDP Internet Connections

RAN Red de Acceso por Radio - Radio Access Network

RTMP Protocolo de Mensajería en Tiempo Real - Real-Time Messaging Protocol

RTSP Protocolo de Transmisión en Tiempo Real - Real-Time Streaming Protocol

SCS espaciamientos de subportadoras - Subcarrier spacings

TDD Duplexación por división de Tiempo - Time Division Duplex

UDP Protocolo de Datagramas de Usuario - User Datagram Protocol

UE Equipo de Usuario - User Equipment

UHD Ultra Alta Definición - Ultra High Definition

UL Relación de Enlace Ascendente - Uplink ratio

UPF Función de Plano de Usuario - User Plane Function

URLLC Comunicaciones Ultra Confiables de Baja Latencia - Ultra Reliable Low Latency Communications

VoD Video bajo demanda - Video on Demand

VR Realidad Virtual - Virtual Reality

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La Tele-Cirugía es un sistema que conecta pacientes y médicos (Especialistas) mediante una red inalámbrica/cableada y un sistema robótico. El robot traduce cada movimiento del cirujano en un movimiento de los instrumentos quirúrgicos, mientras se visualiza la operación quirúrgica en una pantalla de video [1].

Hoy en día existen algunos sistemas (robots) de Tele-Cirugía de vanguardia disponibles con diferentes grados de libertad y para su uso en diferentes tipos de cirugía. Generalmente los robots quirúrgicos constan de 3 brazos robóticos, dos utilizados para manipular instrumentos quirúrgicos y uno para controlar el laparoscopio [2].

Para mejorar la experiencia del uso de estos robots quirúrgicos es de mucha utilidad adaptar tecnología que permita generar inmersión del profesional médico con el robot quirúrgico. En los últimos años las aplicaciones de Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR) han incrementado su comercialización rápidamente en diferentes sectores, involucrando transmisión de Video bajo demanda (VoD) o Transmisión de Video en Vivo (LVS) de 360° de ultra alta calidad [3].

Un informe de la Universidad de Illinois indica que hacia el año 2019 al menos 144 muertes y 1391 lesiones ocurrieron con cirugías robóticas en los Estados Unidos desde 2004 [4]. Esto ocurrió debido a errores del sistema y latencia de la red, lo que genera cierto grado de incertidumbre en la confiabilidad de procedimientos de cirugía remota [5].

Una transmisión en vivo de video de 360° usada para adaptar tecnologías de VR/AR

puede generar problemas con el ancho de banda requerido, debido a que un solo video de 360° de calidad premium a 120 Cuadros por Segundo (FPS) y resolución de 24K puede consumir fácilmente un ancho de banda entre 4 y 5 Gbps. Por lo tanto, la red 5G por sí sola puede no ser suficiente para admitir aplicaciones VR/AR correctamente, su ancho de banda podría desplegar algunas de las aplicaciones, sin embargo, este nivel de rendimiento puede no ser alcanzado por los usuarios la mayoría de las veces [6].

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el presente documento plantea un servicio de LVS de un escenario de Tele-Cirugía simulado usando cámaras de 360° sobre una red 5G y analiza los requisitos mínimos necesarios para garantizar una Calidad de la Experiencia (QoE) aceptable para el usuario final.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Definir los requisitos mínimos necesarios del servicio de streaming de video en vivo en un proceso de Tele-Cirugía, usando cámaras de 360 grados.

1.2.2 Específicos

- Diseñar el escenario hipotético definiendo los componentes y características del servicio de streaming de video en vivo sobre redes 5G, para un proceso de Tele-Cirugía usando cámaras de 360 grados.
- Construir el escenario en un ambiente simulado de acuerdo a los componentes y características previamente establecidas.
- Verificar los puntos umbrales del escenario simulado considerando diferentes métricas para estimar la calidad de experiencia (QoE).
- Determinar las condiciones mínimas más significativas del escenario analizado garantizando una QoE aceptable para el usuario final.

Capítulo 2

Marcos de Referencia

2.1 Marco Teórico

En este capítulo, se presentan los conceptos generales utilizados para el desarrollo de la presente investigación. Los temas expuestos son: Tecnología de Streaming de Video, Redes 5G, Video de 360°, Calidad de la Experiencia y Simuladores de red. En este sentido se consideran que los conceptos presentados son la base fundamental para construir el escenario de simulación.

2.1.1 Streaming de Vídeo

El streaming es una tecnología de transmisión a través de la red, en la que no existe descarga de la información en un disco local y que, por ende, la información que se envía al cliente se reproduce en tiempo real al recibirla [7]. Para que esto suceda, el streaming divide los datos del archivo en pequeños paquetes que se envían en un flujo constante y continuo al búfer de reproducción dispositivo cliente [8].

El almacenamiento en búfer es una forma típica de reducir la fluctuación de retardo de los paquetes de medios antes de la reproducción, sin embargo, incurrirá en un retardo más largo de un extremo a otro. El receptor retrasa la reproducción y coloca la transmisión de datos multimedia en el búfer de reproducción antes de que se represente el primer paquete. Cuando los datos del búfer alcanzan el umbral predeterminado, conocido como punto de reproducción, los datos almacenados en búfer comenzarán a reproducirse [9]. La ocupación del búfer generalmente se registra en segundos de video. Cada segundo, se

elimina un segundo de vídeo del búfer y se reproduce para el usuario. El búfer se drena a velocidad unitaria (ya que se reproduce un segundo cada segundo de tiempo real) [10].

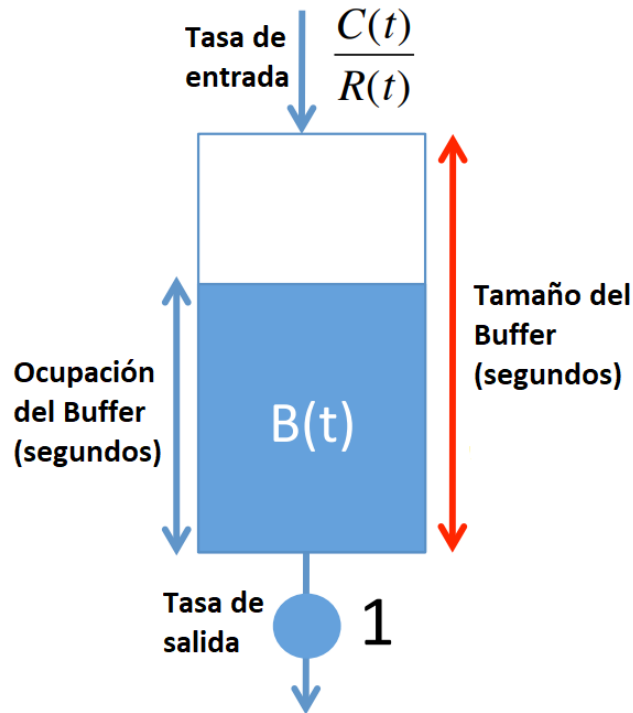


Figura 1: Funcionamiento del Buffer

Basado en figura 2 de [10]

Existen dos sistemas que pueden ser utilizados para transmitir datos de video. El primero es VoD y el otro es LVS [11].

VoD es un sistema de distribución de medios que permite a los usuarios acceder a videos sin un dispositivo de reproducción tradicional, como un reproductor de DVD o la televisión, permitiendo a los usuarios acceder a múltiples contenidos en el momento exacto que lo desee [12].

El término LVS se define como un servicio que permite a los usuarios compartir contenido audiovisual en tiempo real con espectadores de todo el mundo. Tiene un desafío mayor que VoD, debido a que el servicio debe mantenerse continuo en tiempo real y con la menor cantidad de errores posibles [13]. Así, independientemente de cuando se conecta un cliente al servidor, todos ven exactamente el mismo punto de la transmisión en un

instante determinado (excepto las lógicas variaciones de los retardos en la red que hacen que unos clientes reciban antes los datos que otros) [7].

Para poder transmitir un servicio de streaming es necesario traducir los datos de video. La Transmisión de Vídeo Adaptable Dinámica a través de HTTP (DASH) proporciona formatos estandarizados para servicios de transmisión de VoD, así como servicios de LVS. El servidor web codifica el video original a varias velocidades de bits y lo almacena en segmentos de la misma duración de reproducción [14].

2.1.2 Redes 5G

5G es la quinta generación de tecnología celular. Está diseñado para aumentar la velocidad, reducir la latencia y mejorar la flexibilidad de los servicios inalámbricos. 5G proporciona una tecnología de red altamente flexible y escalable para conectar a todos y a todo, en todas partes [15]. Brindará a la sociedad una conexión completa, que pueda romper las limitaciones de tiempo y espacio para crear todas las interconexiones dimensionales centradas en el usuario o centradas en el servicio entre personas y cosas [16]. Por tanto, se espera tener una estrecha interconexión no solo con smartphones, tablets, televisores y dispositivos electrónicos, sino una fuerte comunicación entre las personas y los objetos (ropa, muebles, electrodomésticos, vehículos, plantas, etc), así como también plantea nuevos paradigmas, para dar soporte a servicios de video de alta definición y aplicaciones en tiempo real de baja latencia, entre otros [17].

Una red celular 5G consta de una Red de Acceso por Radio (RAN) y una Red Central (CN), como se muestra en la Figura 2. La RAN está compuesta por celdas, bajo el control de una sola Estación Base (BS). Los Equipo de Usuarios (UEs) están conectados a una BS y pueden cambiar la BS de servicio a través de un procedimiento de traspaso. Las BS se comunican entre sí a través de la interfaz X2, una conexión lógica que normalmente se ejecuta en una red cableada. El plano de datos de la CN consta de una o más Función de Plano de Usuarios (UPFs) que proporcionan la interconexión entre la RAN y la red de datos [18].

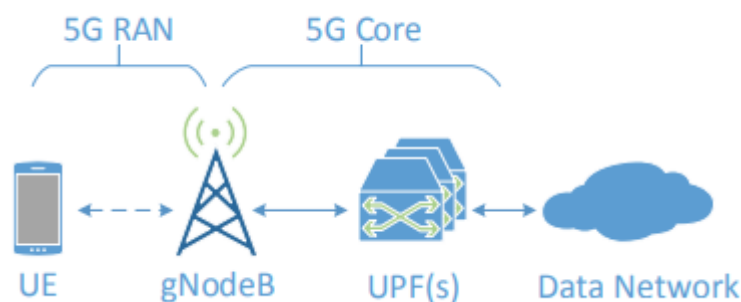


Figura 2: Arquitectura del plano de datos de una red celular 5G [18]

5G toma la base de los fundamentos implementados en las redes 4G LTE, esperando satisfacer las necesidades de futuras aplicaciones inalámbricas como vehículos autónomos, transmisión de video ultra HD (UHD) en 3D, entre otros [19]. Tiene ventajas tales como: Una velocidad de datos entre 1 a 10 Gbps, lo que significa casi 10 veces la velocidad de datos en LTE, que teóricamente está en el orden de 100 Mb/s [20]. Latencia de 1 ms para una ronda de comunicación bidireccional, esta latencia es una décima parte de la latencia en 4G. Gran ancho de banda para manejar varios dispositivos diferentes que están conectados entre sí en un área determinada. Capacidad de manejar la conectividad de una gran cantidad de dispositivos en términos de IoT [21].

La necesidad de la Nueva Tecnología de Acceso de Radio (NR) se basa en la adaptabilidad de usar el espectro de comunicación en un entorno más amplio y abordar casos de uso específicos, para tener la opción de cumplir sus metas y objetivos. Hay tres clasificaciones de espectro: banda baja, banda media y banda alta, como se evidencia en la Figura 3 [22]. El espectro de banda baja está por debajo de 1 GHz, tiene capacidad para proporcionar cobertura exterior e interior profunda. 5 MHz, 10 MHz y 20 MHz son los anchos de banda de canal típicos desplegados en este rango de espectro. El espectro de banda baja es la base de una gran cantidad de servicios 2G, 3G y 4G existentes, así como de IoT, y seguirá sirviendo a estos segmentos en el futuro. El espectro de banda baja se utilizará para aplicaciones 5G que no requieren una latencia súper baja y velocidades de datos persistentes altas y, por lo general, está optimizado para implementaciones de red

de macrocelda (cobertura de área amplia) [23].

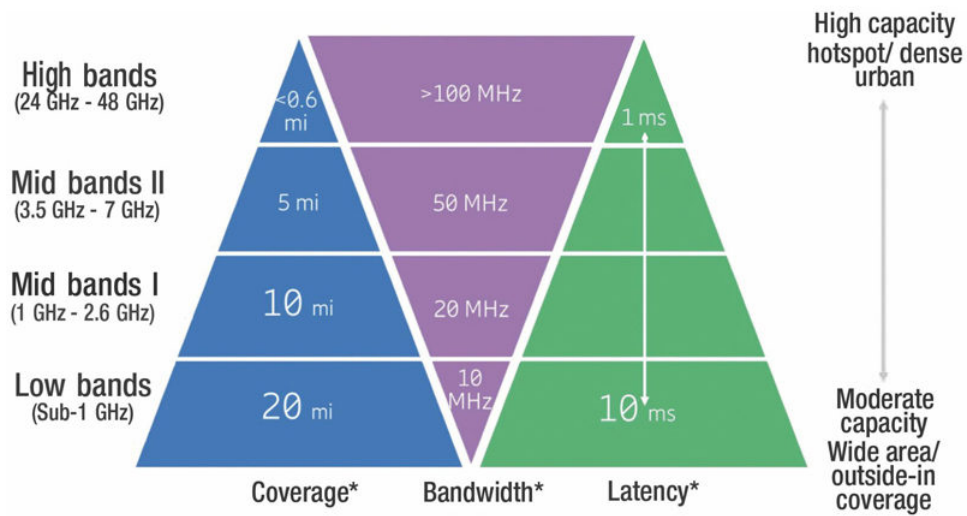


Figura 3: Clasificaciones de espectro en 5G

El espectro de banda media generalmente se considera un espectro por encima de 1 GHz y por debajo de 6 GHz, pero en algunos casos puede abordar el espectro hasta 8 GHz. Las características de cobertura, rendimiento, latencia y capacidad del espectro de banda media lo convierten en un excelente candidato para el despliegue de servicios 5G Comunicaciones Ultra Confiables de Baja Latencia (URLLC). Estas características se pueden mejorar aún más mediante la combinación de activos de espectro de banda media y banda baja. El espectro de banda media generalmente se optimiza para implementaciones de macroceldas y/o implementaciones de celdas pequeñas entre 3 GHz y 6 GHz. En conjunto, las bandas de 450 MHz a 6 GHz se conocen como FR1 de 5G [23].

El espectro de banda alta puede referirse a cualquier cosa por encima de 12 GHz y dentro de esta clasificación se encuentra el espectro de ondas milimétricas que se extiende desde 30 GHz hasta 300 GHz. Las implementaciones iniciales de 5G aquí están dirigidas al rango de frecuencia de 24 GHz a 52 GHz conocido colectivamente como FR2 de 5G. En estas frecuencias, los anchos de banda de los canales suelen ser de 50 MHz o 100 MHz, con la posibilidad de agregar varios canales contiguos para permitir servicios multigigabit bidireccionales [23].

Técnicamente, la tecnología 5G tiene tres escenarios, como se evidencia en la Figura 4:

la Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB), Comunicaciones Masivas de Tipo de Máquina (mMTC), y las URLLC [24].

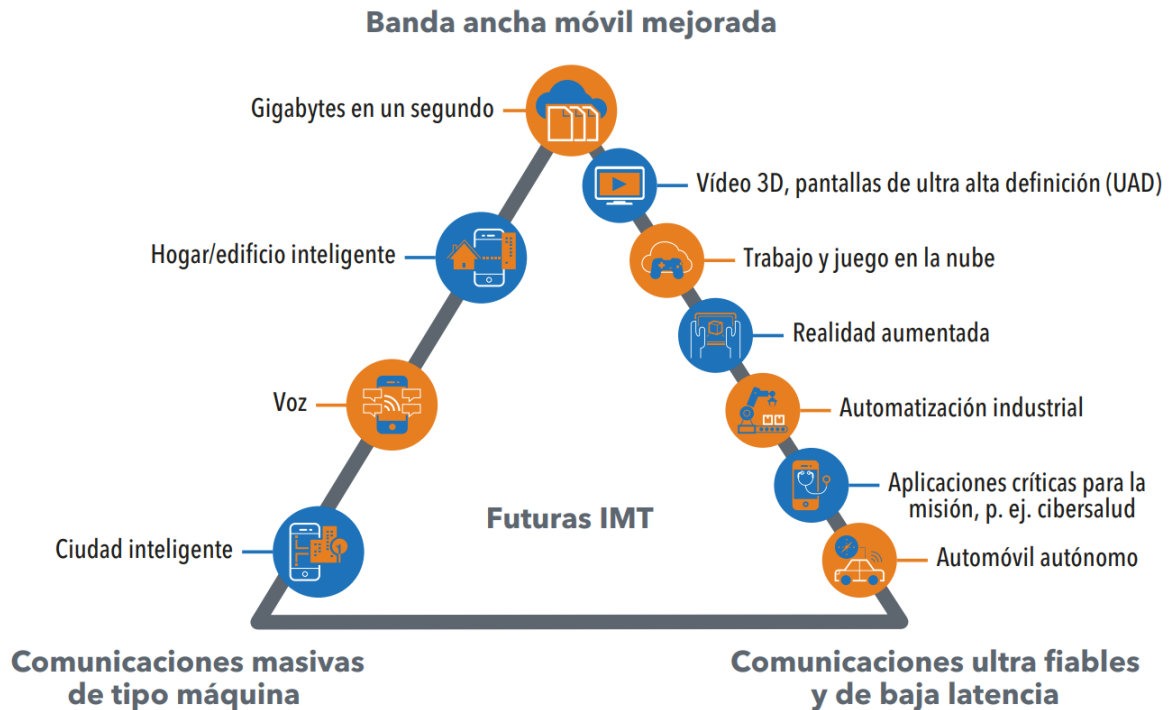


Figura 4: Escenarios de la tecnología 5G [25]

2.1.2.1 eMBB

La banda ancha móvil mejorada es la próxima generación de experiencias de entretenimiento, admite aplicaciones para satisfacer las demandas de los usuarios de altas velocidades de datos superiores a 10 Gbps con una latencia de menos de 1 ms [26], y se enfoca en servicios que requieren altos requisitos de ancho de banda con un mínimo de 50-100 Mbps, como video de alta definición y realidad virtual para juegos, educación, capacitación y también servicios como la conducción autónoma. Ofrece calidad de video 1080p, 2K, 4K y también 8K [27].

El tráfico eMBB puede considerarse una extensión directa de LTEAdvanced. Su objetivo es maximizar la tasa de datos en varios gigabits por segundo [28], garantizando al mismo

tiempo una confiabilidad y una latencia moderada (unos pocos milisegundos), con una tasa de error de paquetes (PER) del orden de 10^{-3} [29].

Los servicios eMBB han comenzado a utilizar el protocolo de Conexiones UDP rápidas en Internet (QUIC) basado en HTTP / 3 para cumplir con los requisitos de demora. Este protocolo reduce la configuración de la conexión; y por lo tanto, reduce el tiempo de ida y vuelta del flujo. Sin embargo, utiliza más paquetes duplicados en forma de enlace descendente para eliminar el mecanismo de reconocimiento de versiones anteriores de HTTP. Debido a esta característica, los servicios eMBB provocan una mayor intensidad de tráfico en Core que antes [30].

2.1.2.2 mMTC

Las comunicaciones masivas de tipo máquina cubren varias aplicaciones, como ciudades inteligentes, salud electrónica y dispositivos portátiles inteligentes, con toneladas de dispositivos tipo máquina, a menudo de baja complejidad y bajo consumo que solo están activos esporádicamente y envían pequeñas cargas útiles de datos [29].

Muchas aplicaciones de mMTC ya son atendidas por los sistemas de comunicación actuales. Sin embargo, las propiedades de mMTC, es decir, la gran cantidad de dispositivos con poca cantidad de datos enviados y alta tolerancia a la latencia, requieren un bajo costo de fabricación y una batería de larga duración [31]. 5G ofrece la oportunidad de abordar los desafíos críticos en un sistema celular integrado que combina mMTC y todos los demás servicios [32].

Los Dispositivos de tipo de máquina (MTD) son dispositivos de baja potencia que se encuentran activos de forma intermitente y utilizan una velocidad de transmisión fija, normalmente baja, en el enlace ascendente. El objetivo de mMTC es conectar una gran cantidad de MTD a la red celular. Normalmente, estos MTD se conectan de forma asíncrona y esporádica a la red para transmitir pequeñas cargas útiles de datos. La gran cantidad de MTD potencialmente activos hace que no sea factible asignar recursos a priori a dispositivos mMTC individuales. En cambio, es necesario proporcionar recursos que se puedan compartir mediante acceso aleatorio [29].

2.1.2.3 URLLC

Uno de los casos de uso más desafiantes, que aborda 5G, es la habilitación de la URLLC [33]. Los servicios de URLLC tienen requisitos extremadamente estrictos sobre el rendimiento, el retraso y la confiabilidad de los datos. En particular, se espera que URLLC habilite nuevas aplicaciones, por ejemplo: vehículos autónomos, sistemas industriales automáticos, sistemas de realidad virtual, cirugía de telemedicina, la automatización de distribución de redes inteligentes, la seguridad del transporte, etc [31].

En el Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP), se define la latencia como el tiempo que lleva entregar con éxito un paquete / mensaje de la capa de aplicación entre el transmisor y el receptor a través de la radio. Y define la confiabilidad como la probabilidad de éxito (relación entre el número de paquetes recibidos correctamente y el número total de paquetes transmitidos) de transmitir X bytes dentro de un cierto retraso [34].

Especialmente en el área de 3GPP, la confiabilidad está relacionada con los requisitos basados en el tiempo mediante plazos de latencia, a menudo en el rango de milisegundos, por ejemplo, 250 μ s para la automatización de fábricas, 3 ms en redes inteligentes y 10 ms para sistemas de transporte inteligentes [35].

Dado que habrá una variedad de servicios URLLC con diferentes requisitos, la confiabilidad objetivo se establece para lograr una probabilidad de éxito de $1-10^{-5}$ (99,999 %), es decir un PER inferior a 10^{-5} para un tamaño de paquete de 32 bytes dentro de una latencia del plano de usuario de 1 ms [29].

2.1.3 Video 360

Los videos de 360° proporcionan un medio para romper el marco y generar una experiencia completamente inmersiva que transporta al espectador a otro mundo y le permite examinar todas las direcciones a la vez [36].

Hay dos tipos de videos de 360° y tienen diferentes requisitos para la disposición de la cámara. El video 360° estereoscópico permite al espectador sentir la profundidad en todas las direcciones al mostrar imágenes ligeramente diferentes en el ojo izquierdo y derecho,

tal como vemos el mundo. Por otro lado, el video 360° monoscópico parece plano porque el ojo izquierdo y el derecho ven las mismas imágenes. En este tipo de videos se puede mover el enfoque de la cámara, pero no aporta ninguna percepción de profundidad [37].

Estos tipos de videos suelen consumir más ancho de banda que los videos normales, ya que requieren más datos (petición de información) para cubrir todas las direcciones espaciales, por lo que tienen tasas de bits sustancialmente más altos y una mayor cantidad de resoluciones, por ejemplo, para una resolución de 24K, pueden consumir un ancho de banda entre 4 y 5 Gigabits por segundo (Gbps)[6]. Este aumento en la resolución ciertamente contribuirá al crecimiento del tráfico de video, especialmente para redes inalámbricas como celulares e incluso WiFi. Las redes inalámbricas actuales pueden tener problemas para satisfacer esta creciente demanda [38].

La resolución visual en los sistemas de video se define como el más mínimo detalle que se puede ver. Este detalle está relacionado directamente con el ancho de banda de la señal: cuanto más ancho de banda haya en la señal, mayor será la resolución visual potencial. De otra manera, cuanto más limitada esté la señal en banda, menos información detallada será visible. El ancho de banda es la cantidad de información que puede transmitirse en un segundo por un canal de comunicación. Teóricamente, el ancho de banda del video es igual a la multiplicación de la velocidad de las imágenes (número de cuadros por segundo que se transmiten) y el tamaño promedio de cada imagen (depende del algoritmo de compresión, la resolución de la imagen de video y la escena que se esté observando) [39].

2.1.4 Calidad de la Experiencia

La QoE es un método que mide la experiencia de transmisión de un producto o servicio percibida por los usuarios finales basada en la medición subjetiva u objetiva. Los métodos de QoE tienen como finalidad la retroalimentación del usuario sobre servicios particulares, preferiblemente en parámetros de red. La definición de QoE según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) se da en “el grado de satisfacción o molestia del usuario de una aplicación o servicio” [40].

En general, la QoE se puede medir mediante un seguimiento objetivo o una prueba sub-

jetiva. En el enfoque objetivo, se crean modelos matemáticos (algoritmos) basados en el sistema visual humano para evaluar la calidad de los videos sin interferencias externas. La prueba subjetiva es obtener la representación cuantitativa de QoE pidiendo a los usuarios que califiquen los contenidos de video recibidos durante su reproducción en un ambiente controlado. Se cree que es el reflejo más preciso de la calidad de vídeo percibida por los usuarios, aunque son costosos y complejos debido a que implican el uso de personas [41].

Los modelos de QoE actuales, incluidos los promovidos por los organismos de normalización, no se centran en las redes 5G, donde existen desafíos adicionales como la virtualización, la movilidad y los requisitos de tenencia múltiple [42].

Con respecto a la evolución de las comunicaciones móviles, la principal preocupación de la evaluación de QoE en 2G era medir el nivel de claridad de las llamadas de voz, mientras que en las redes 3G se trataba de medir la velocidad de los datos. En la red 4G, la evaluación de QoE se ha ampliado aún más para facilitar las aplicaciones multimedia, VoLTE, la experiencia de juego y el rendimiento de otros servicios a través de redes LTE. Mientras tanto, QoE en una red 5G es el nivel de satisfacción del usuario al cubrir las necesidades de los tres escenarios de uso presentados por la ITU (URLLC, mMTC, eMBB) [43].

En la medición subjetiva de la QoE, la evaluación de los servicios se realiza utilizando la Puntuación de Opinión Media (MOS), que es un método de comparación de rendimiento usado para medir la calidad del lenguaje oral humano después de que este se haya sometido a la transmisión y a la compresión, posee una calificación métrica de 1 (malo) a 5 (excelente) donde la cantidad de puntos obtenidos de una prueba o medición se promedian para obtener el puntaje final. Importante destacar que, al proporcionar una única escala de medición común para diferentes tipos de tráfico, MOS proporciona los medios para realizar una gestión integrada del tráfico y la asignación de recursos a través del tráfico de características diferentes (por ejemplo, video y datos en tiempo real) [44]. Mientras tanto, la QoE objetiva es una medida que utiliza un modelo de estimación para medir QoE al involucrar parámetros de la Calidad del Servicio (QoS) [43].

Investigaciones recientes han estado trabajando en la dirección de estimar la QoE a partir de mediciones de tráfico que mapean los parámetros de QoS objetivos en valores subjeti-

vos. Aunque las mediciones de QoS y QoE son bastante diferentes, tienen un alto grado de correlación [42]. El proyecto Habilitadores de comunicaciones móviles e inalámbricas para la Veinte Veinte (METIS) ha proporcionado siete Indicadores Clave de Rendimiento (KPI), que se usan como los principales parámetros de QoS y deben evaluarse en el modelo de evaluación de 5G QoE, estos parámetros son: densidad del volumen de tráfico, rendimiento de usuarios, latencia, fiabilidad, disponibilidad, consumo de energía y costo [43].

2.1.5 Simuladores de Red

Actualmente, existen gran cantidad de herramientas de simulación utilizadas para recrear el funcionamiento de la red lo más real posible, cada una con características y capacidades diferentes. Entre las más conocidas se encuentran OMNET++, OPNET, NS3, NetSim, GNS3, EstiNet, Qualnet, J-sim, entre otras. Para el propósito del trabajo se consideró viable trabajar con OMNET++ que es una plataforma de simulación con una arquitectura modular, flexible al hacer diseños y modelos de redes, protocolos, multiprocesadores o arquitecturas hardware, lo que hace que sea viable para sistemas donde se deban modular grandes redes, tiene compatibilidad con sistemas operativos Linux y Microsoft Windows. Esta herramienta se conforma por módulos escritos en C++ y Network Description, lenguaje propio para definir la topología de los módulos [45].

NS3 es un simulador de eventos discretos de red, de código abierto [46]. Escrita solo en C++ lo que hace que sea más fácil de depurar, las plataformas que soportan esta herramienta tanto de escritorio como de servidor son i386, x86-64, Linux, OS X, freeBSD, Solaris y Windows. Utiliza una gama de protocolos inalámbricos como 802.11a, 802.11b, 802.11e, 802.11g y respecto a las tecnologías, permite simulaciones sobre IPv4 e IPv6, Wireless como Wifi y Wimax [45];

2.2 Marco de Antecedentes

En esta sección se presentan los trabajos más relevantes realizados en cada uno de los ejes temáticos que abarcan el propósito del trabajo de investigación. Los ejes temáticos

son: tele-cirugía, evaluación de la calidad de vídeo y transmisión de videos de 360°. Se realiza un análisis sistemático, el cual tiene como propósito integrar de forma objetiva y sistemática los resultados de los estudios empíricos enfocados en los ejes temáticos.

“SLAMCast: Large-Scale, Real-Time 3D Reconstruction and Streaming for Immersive Multi-Client Live Telepresence” [47]

Este artículo presenta un sistema de reconstrucción y transmisión 3D de un servicio de telepresencia multiclente inmersiva para escenarios de colaboración remota, tales como entretenimiento, publicidad, enseñanza, exploración, entre otros. El sistema consta de un cliente de reconstrucción, un servidor (que administra el modelo reconstruido y los estados de transmisión) y clientes de exploración. El objetivo principal del sistema era permitir a los clientes remotos una inspección en vivo inmersiva e interactiva del escenario utilizando dispositivos de realidad virtual, donde los usuarios pudieran explorar e interactuar con la escena capturada y al mismo tiempo observar las interacciones del otro cliente. Finalmente, los autores realizaron un experimento de colaboración remota en vivo, donde dos usuarios locales y un usuario remoto, los cuales no estaban familiarizados con el sistema, debían inspeccionar interactivamente el entorno del usuario local permitiendo ciertas manipulaciones de la escena, obteniendo resultados positivos y alto grado de aceptación por parte de los usuarios.

“Investigating the use of Different Visual Cues to Improve Social Presence within a 360 Mixed Reality Remote Collaboration”

[48]

En este artículo los autores presentaron una manera de mejorar la sensación de presencia social en un entorno de Realidad Mixta (MR) adicionando señales visuales a los videos de 360 grados transmitidos y especificando que el uso de MR implica trabajar con AR para un usuario local y VR para un usuario remoto. Por lo tanto este trabajo permite la comunicación no verbal entre un usuario remoto y un usuario local trabajando en un mismo entorno ya sea juntos o independientes. En las pruebas los usuarios locales usaron

las gafas HoloLens AR para ver las señales visuales y la cámara Ricoh Theta V para compartir su entorno.

Los autores plantearon tres escenarios: el primero fue una colaboración remota simétrica en la que ambos usuarios trabajaron juntos para decorar una estantería con pistas proporcionadas. En el segundo los participantes trabajaron junto con un actor para colocar 5 objetos aleatorios en una estantería vacía, cumpliendo el papel de experto remoto y trabajador local. En el último escenario similar al primero, el usuario local debía decorar una estantería siguiendo estrictamente las instrucciones dadas por el usuario remoto. Además, trabajaron tres tipos de señales visuales, gestos con la mano, señalando y dibujando. Los resultados obtenidos fueron: el uso de señales visuales puede mejorar significativamente la sensación de presencia social, reduciendo el esfuerzo de comunicación entre los usuarios. Cada tipo de señal visual tiene su importancia en escenarios específicos.

“A Delay Compensation Approach for Pan-Tilt-Unit-based Stereoscopic 360 Degree Telepresence Systems Using Head Motion Prediction” [49]

Este artículo presenta un enfoque de compensación de retraso, basado en un predictor del movimiento de la cabeza incorporando vídeo estereoscópico de 360°. La configuración del sistema considera, el lado del operador y el lado remoto. El lado del operador presenta un usuario con unas gafas HMD y el lado remoto utiliza una cámara estéreo montada en una PTU (Unidad de Pan-Tilt) que imita el movimiento de la cabeza y devuelve videos de la escena remota para el ojo izquierdo y derecho, ambos conectados a través de una red de comunicación. La funcionalidad del sistema consiste en mostrar solo un subconjunto del campo de visión capturado, aprovechando el contenido de la imagen restante para la compensación del retraso local hasta que llegue el marco actualizado. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo principal la disminución del retraso de comunicación entre el operador y el lado remoto para mejorar la calidad de la experiencia del usuario.

El sistema predictor consiste en tres pilares: la suma ponderada de la trayectoria pasada, la estimación del estado actual y un elemento de amortiguación para mitigar el efecto

de sobre impulso. La suma ponderada de estos tres términos producen el valor de predicción final. Para validar el enfoque, crearon un conjunto de datos de movimiento de la cabeza con 30 participantes en condiciones reales. Además, implementaron predictores de vanguardia, para aplicarlos al enfoque de compensación y comparar los resultados con el propuesto. Finalmente, los autores concluyeron que las medidas cualitativas verificaron el desempeño superior del enfoque de compensación mejorando el nivel de latencia.

“An Experimental Feasibility Study on Robotic Endonasal Telesurgery” [50]

Este artículo describe la realización de un experimento de extirpación de tumor hipofisario fantasma realizado dos veces, una localmente y otra remotamente, con un sistema robótico. Los autores presentan como objetivo principal, explorar la viabilidad de controlar de forma remota las herramientas quirúrgicas a largas distancias para la cirugía de la base del cráneo endonasal, con movimientos de herramientas y video endoscópico transmitido a través de Internet.

En este trabajo, el cirujano manipuló una interfaz maestra (Phantom Omni, Sensable, Inc) para controlar los manipuladores de tubos concéntricos bajo visualización endoscópica. Los movimientos del cirujano fueron mapeados a los movimientos del robot usando un algoritmo estándar de tasas resueltas. El cirujano estaba ubicado en la Universidad de Vanderbilt (Nashville , Tennessee), y el robot en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill (Chapel Hill, Carolina del Norte) para la prueba remota. Utilizaron una computadora para capturar el vídeo del endoscopio y enviar el video al cirujano utilizando el software gratuito de Skype. El cirujano realizó cada experimento en 20 minutos tanto en el caso local como en el caso remoto, durante ese período, transfirieron y analizaron aproximadamente 120.000 paquetes para determinar la latencia y la IAT (tiempo entre llegada). La señal de control del cirujano tenía una latencia promedio de 10.37 milisegundos. La transmisión de video Skype entregó una latencia de vídeo con un promedio de 80 milisegundos. Por lo tanto, los resultados indicaron que son posibles latencias extremadamente bajas sobre conexiones de Internet estándar.

“Live delivery of neurosurgical operating theater experience in virtual reality” [51]

Este artículo describe un sistema de reconstrucción y transmisión virtual a múltiples usuarios con visión estereoscópica en 360 grados, de las instalaciones del departamento de neurocirugía del Hospital Universitario de Helsinki. Los autores presentan como objetivo principal del proyecto, permitir que estudiantes puedan participar de forma interactiva y remota en las demostraciones de neurocirugía de un curso en vivo realizado por el Hospital Universitario.

En las pruebas del proyecto participaron un total de 22 neurocirujanos (17 hombres y 5 mujeres) con una edad promedio de 39 años y 9 años de experiencia en neurocirugía, los cuales fueron recibidos en una sala de conferencias cuya ubicación era diferente a la del hospital. Los participantes recibieron una inducción para familiarizarse con la vista del quirófano en tiempo real con las gafas Samsung Gear VR conectadas a un Samsung Galaxy S7, pero para el estudio del usuario real utilizaron las gafas Oculus Rift, equipadas con un controlador de mano, lo que les permitió ver la experiencia interactiva de neurocirugía en tiempo real.

Dentro de los resultados encontraron que el sistema era práctico y fácil de usar permitiendo a los participantes experimentar la operación casi como si estuvieran presentes en el quirófano.

“Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery” [52]

Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo DT (gemelo digital) para analizar los requisitos de comunicación en una aplicación de misión crítica, como las redes móviles compatibles con cirugía remota. El DT consta de tres partes: producto físico, producto digital y la vinculación entre los productos físicos y digitales. El sistema desarrollado consta de un brazo robótico y un sistema de realidad virtual HTC vive (VR) conectado a través de una red móvil 4G. Para la programación del robot utilizaron Universal Robots UR3 por su extenso lenguaje de programación, Unity y OpenVR, para crear la escena de realidad virtual. En la escena, un paciente ficticio virtual estaba ubicado encima de una mesa virtual para reflejar a un paciente ficticio físico (conejo de peluche), que estaba sobre una mesa en el mundo real. El sistema estaba separado en dos sitios, el sitio de realidad virtual y el sitio del robot. Ambos sitios ejecutaban una computadora servidor que manejaba las redes y la mayor parte del procesamiento de datos. La conexión fue creada a través de un servidor OpenVPN ejecutado en un servidor en la nube en Helsinki, capital de Finlandia. La configuración de la conexión de red utilizó el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP) para alcanzar una entrega rápida de los paquetes a través de la conexión de red móvil.

El robot pudo replicar con precisión el movimiento de la mano humana con la configuración del bucle de control desarrollado. Implementaron sesiones de prueba con más de 70 usuarios en varias configuraciones. El sitio del brazo robótico y el sitio de realidad virtual fueron ubicados aproximadamente a 10 km de distancia con transmisión de video por separado, en una de las sesiones de prueba. Finalmente, crearon una experiencia de realidad mixta al traer un video de la vida real a la escena de realidad virtual, con dos versiones diferentes. Estos modos de retroalimentación visual ayudaron mucho más a los usuarios en comparación con la retroalimentación de fuerza. Sin embargo, la calidad del video fue inadecuada. En condiciones óptimas de red y sin experimentar ningún ataque, el sistema funcionó sin problemas y casi sin demoras. Los retrasos del sistema no fueron medidos con precisión, pero permanecieron indetectables y por debajo de 150 ms.

“Medical Telerobotics and the Remote Ultrasonography Paradigm Over 4G Wireless Networks” [53]

En este artículo, los autores analizaron los sistemas robóticos médicos de hoy en día y sus limitaciones, ya que generalmente operan con el médico residiendo en el mismo lugar que el paciente, y los estudios sobre operarlos remotamente a largas distancias permanecen en gran parte sin explotar.

Este sistema utilizó un robot tele operado a larga distancia con el H.264/AVC, que es el estándar de codificación de vídeo más utilizado en la actualidad. Los autores presentan como objetivo principal del proyecto, investigar la capacidad del estándar sobre las redes inalámbricas 4G-LTE para proporcionar comunicaciones de video en tiempo real y sin pérdidas.

En las pruebas, los autores usaron el sistema robótico MELODY para realizar teleecografías, el cual permitía adquirir un conjunto de datos de 9 videos de ultrasonido cardíaco, obteniendo un diagnóstico remoto seguro y confiable sobre redes 4G emergentes.

“360ProbDASH: Improving QoE of 360 Video Streaming Using Tile-based HTTP Adaptive Streaming” [54]

La transmisión adaptativa HTTP basada en mosaicos es una forma prometedora de entregar video 360 a través de Internet. Sin embargo, invoca diferentes problemas, como son: error de obtención previa de mosaicos, bloqueo de reproducción y borde de mosaicos de tasa de bits mixta. Este artículo presenta un sistema de transmisión adaptativo basado en mosaicos probabilísticos, 360ProbDASH, que aprovecha el modelo probabilístico de predicción de la ventana gráfica y el marco de optimización de la calidad esperada para maximizar la calidad de la transmisión adaptativa de la ventana gráfica.

En la adaptación de la ventana gráfica construyeron un modelo probabilístico para so-

lucionar el error de predicción de la ventana gráfica. Luego, formularon un problema de optimización basado en QoE: minimizar la distorsión de calidad esperada de los mosaicos y la variabilidad espacial de la calidad bajo la restricción de la tasa de bits de transmisión total. Además, implementaron un prototipo 360ProbDASH y llevaron a cabo experimentos extensos en un banco de pruebas de simulación e Internet del mundo real con varios rastros de movimiento de la cabeza de usuarios reales. Para evaluar el rendimiento de 360ProbDASH, examinaron el rendimiento en la secuencia de video. La secuencia duró 3 minutos con una resolución de 2880×1440 en formato ERP. Cortaron el video en trozos pequeños con una duración constante de 1 segundo ($T = 1$). Luego, para cada trozo, lo dividieron en 6×12 mosaicos ($N = 72$). Los niveles de velocidad de bits de cada segmento se establecieron en 20kbps, 50kbps, 100kbps, 200kbps, 300kbps. El códec de vídeo es el codificador de código abierto x264, ampliamente utilizado. Todos los segmentos de video fueron empaquetados por la herramienta MP4Box. Finalmente, los autores concluyeron que el enfoque propuesto supera a otros métodos en V-PSNR, suavidad de calidad espacial y continuidad de reproducción.

“Modeling QoE of Virtual Reality Video Transmission Over Wireless Networks” [55]

Este artículo propone un modelo general de medición de Calidad de la Experiencia (QoE) basado en la transmisión de videos de 360 grados VR fundamentado en el análisis matemático de las relaciones entre QoE y otras variables, en función de la puntuación de opinión media (MOS). Para la transmisión eficiente de estos videos los autores utilizaron la técnica de dividir el video 360 en mosaicos $N \times N$, transmitiendo solo el conjunto de mosaicos que cubren el campo de visión actual de un usuario.

Para el experimento, los autores seleccionaron 10 videos con una resolución de 4k (3840×2160) y una duración entre 30 y 40 segundos, cada video panorámico dividido en mosaicos de 4×4 , 6×6 y 8×8 (lo que significa 16, 36 y 64 mosaicos respectivamente). Además, utilizaron las siguientes herramientas: Gafas HTC Vive como dispositivo HDM,

asiento giratorio para que los participantes pudieran ver el video en diferentes direcciones y la Vive Cinema como el software de reproducción.

El experimento fue realizado en el laboratorio universitario de los autores, el cual cumple con la ITU-R BT.500-11 recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). Fueron seleccionados 40 participantes de la universidad, 30 hombres y 10 mujeres, los cuales fueron capacitados viendo una serie de videos 360 VR con diferentes contenidos y calidades diferentes, para posteriormente reproducir los videos del experimento.

Después de ver cada video los participantes calificaron su experiencia de uso, puntuación que fue dividida en 5 niveles: excelente, bueno, regular, pobre y malo. Recopilaron cuatro tipos de datos: puntuación de cada participante, ángulo de visión en tiempo real, el número y la duración de las paradas durante cada reproducción de video, y el número de amplitud de los interruptores de resolución. El modelo general presentado y las simulaciones demostraron que los modelos presentes en este artículo son lo suficientemente precisos como para ser utilizados en una evaluación de QoE.

“A Subjective Study on QoE of 360 Video for VR Communication” [56]

Este artículo evalúa la calidad de la experiencia (QoE) percibida en la visualización de videos de 360 grados, comparando el uso y la ausencia de la Realidad Virtual. La QoE en este proyecto es medida con respecto a 4 factores principales: calidad perceptiva, presencia, aceptabilidad y mareo cibernético (cybersickness, sensación de náuseas generada en los espectadores que observan videos de 360 grados). La ausencia de Realidad Virtual o modo no VR consiste en ver videos de 360 grados en teléfonos inteligentes sin usar gafas de realidad virtual (HMD), donde los espectadores pueden cambiar el punto de vista moviendo el teléfono, mientras que en el modo VR si usa este tipo de gafas y los espectadores pueden cambiar el punto de vista girando la cabeza.

Para este proyecto fueron utilizados dos conjuntos de dispositivos diferentes (Samsung Gear VR HMD y Samsung Galaxy S6 vs Google Cardboard HMD y Samsung Galaxy

S5). Los autores trabajaron con tres videos diferentes de 30 segundos cada uno a 30 fps, con cuatro tipos de resoluciones (4k, 2.5k, fHD y HD) y cinco tipos de combinaciones de codificación, logrando un total de 60 transmisiones para los tres videos.

Participaron un total de 36 personas en el experimento con una edad promedio de 23 años, fueron divididos en partes iguales en los dos conjuntos de dispositivos y además fueron capacitados para acostumbrarse a ellos. Los participantes debían observar cada una de las transmisiones con y sin las gafas de realidad virtual y evaluar su experiencia de uso en cada uno de los escenarios.

Como resultados se obtuvieron que: A una resolución de 4K la tasa de aceptabilidad de todos los videos es del 100 %. Un 93 % de los participantes sufrieron de mareo cibernético (cybersickness) lo que resulta en un problema crítico para los videos de 360 grados. No hay una diferencia significativa para la QoE entre resoluciones de 4K y 2.5K, sin embargo, las puntuaciones disminuyen con resoluciones de fHD y HD. Las tasas de aceptabilidad de video en resolución HD son de aproximadamente 60 % o menos. La sensación de presencia en los espectadores es mayor en videos con movimiento de cámara medio, disminuye esta sensación con cámaras estáticas y movimiento rápido de cámara. La percepción de calidad es menor usando gafas de VR que sin usarlas, esta diferencia aumenta cuando reduce la resolución, aunque los porcentajes de espectadores que prefieren un ambiente de VR fue mayor a los que no.

“Subjective and Viewport-based Objective Quality Assessment of 360-degree videos” [57]

Este artículo describe un estudio de calidad subjetiva de VQA (evaluación de la calidad visual) centrado en el impacto de distorsiones visuales en la calidad percibida del contenido de 360 grados consumido a través de HMD. Además, miden el rendimiento de las métricas de calidad objetiva estándar calculadas tanto en los dominios de proyección como en los de visualización en el conjunto de datos obtenidos. Los avances en VQA de medios inmersivos son de fundamental importancia para proporcionar servicios optimizados y de alta calidad que garanticen el mejor equilibrio entre el uso de recursos y la buena calidad de experiencia (QoE) del usuario final.

Para el desarrollo del experimento consideraron cuatro distorsiones principales: bloqueo, costuras, desenfoque y compresión H.264. Como primera medida establecieron un conjunto de datos de calidad subjetiva para videos EAC (mapa de cubo equiangular) de 360 grados que introdujo tipos de distorsión visual específicos mezclando contenido tanto monoscópico como estereoscópico. Luego, analizaron el rendimiento de las métricas objetivas calculadas tanto en el dominio de proyección como en las ventanas gráficas extraídas del contenido de 360 grados contra las puntuaciones subjetivas recopiladas. Los experimentos mostraron que: las distorsiones visuales tienden a afectar más la calidad del contenido estereoscópico de 360 grados que su contraparte monoscópica; calcular métricas objetivas en las ventanas gráficas proporciona una mejor correlación con los estudios subjetivos que calcularlos en el dominio de proyección; y finalmente existe todavía la necesidad de nuevas métricas orientadas a la percepción que puedan medir de manera confiable las distorsiones visuales específicas que ocurren en el contenido procesado de 360 grados por el hecho de que no existe una única métrica que funcione mejor para todas las diferentes distorsiones.

“An Evaluation of Quality Metrics for 360 Videos” [58]

Este artículo realiza una comparación entre las QoE objetiva y subjetiva que genera la visualización de vídeos de 360 grados con el fin de identificar las métricas de calidad objetivas de este tipo de videos. Los autores exponen cinco tipos básicos de métricas de calidad objetiva: Proporción Máxima de Señal a Ruido (PSNR), ponderado a PSNR esféricamente uniforme (WS-PSNR), PSNR esférica sin interpolación (S-PSNR-NN), PSNR esférica con interpolación (S-PSNR-I) y PSNR en la proyección parabólica de Craster (CPP-PSNR). Estas métricas pueden clasificarse en tres grupos: medición de distorsión de codificación, medición de distorsión de formato cruzado y medición de distorsión de extremo a extremo. De la combinación entre las métricas y los tres grupos surgen 10 tipos de medidas de calidad objetivas.

En el experimento los autores tomaron 3 videos de 360 grados con diferentes valores de codificación y resolución, generando un total de 60 transmisiones. Además, utilizaron la puntuación de opinión media (MOS) como métrica de calidad subjetiva, obteniendo resultados similares a los trabajos [55] [56].

Finalmente, los autores concluyeron que: con respecto a la calidad objetiva, las medidas de calidad objetivas en la medición de la distorsión de formato cruzado y en la medición de la distorsión de extremo a extremo están más cerca de la percepción del usuario que en la medición de la distorsión de codificación. El PSNR tradicional que tiene el cálculo más simple, tiene coeficientes de correlación similares a los de las otras medidas en la medición de distorsión de extremo a extremo. Por lo tanto, PSNR en la medición de distorsión de extremo a extremo puede usarse directamente para videos 360.

2.2.1 Brechas

ARTÍCULO	BRECHA	APORTE
SLAMCast: Large-Scale, Real-Time 3D Reconstruction and Streaming for Immersive Multi-Client Live Telepresence	La adquisición y reconstrucción de una escena con una cámara RGB-D de un dispositivo móvil actual puede ser un desafío para los usuarios inexpertos, pues es probable que la imagen quede con desenfoque de movimiento y una reconstrucción de la escena de baja calidad.	Se descarta como aporte al proyecto por su relación a la reconstrucción y transmisión 3D para escenarios de colaboración remota evaluados con dispositivos de realidad virtual ya que el enfoque del proyecto no tocará dichos escenarios.
Investigating the use of Different Visual Cues to Improve Social Presence within a 360 Mixed Reality Remote Collaboration	El escenario utilizado en las pruebas es muy restringido, estudiar en un espacio de trabajo real podría ayudar a identificar posibles beneficios o problemas con el uso de un sistema como el mencionado en el artículo.	Se descarta como aporte al proyecto ya que está centrado en la mejora de la presencia social en entornos de realidad mixta y el enfoque del proyecto no evaluará dichos escenarios.

ARTÍCULO	BRECHA	APORTE
A Delay Compensation Approach for Pan-Tilt-Unit-based Stereoscopic 360 Degree Telepresence Systems Using Head Motion Prediction	Hace falta aplicar aprendizaje profundo para mejorar aún más la predicción del movimiento de la cabeza y realizar experimentos subjetivos basados en la puntuación de opinión media (MOS) para evaluar la calidad de la experiencia.	Aporta al proyecto debido a su relación en mejorar el retraso de transmisión de video de 360° para mejorar la calidad de la experiencia del usuario.
An Experimental Feasibility Study on Robotic Endonasal Telesurgery	Falta diseñar interfaces de herramientas modulares similares al robot da Vinci. Realizar experimentos para validar el sistema al interactuar con tejidos perfundidos, posiblemente en un modelo animal, y pruebas adicionales en cadáveres.	Se descarta como aporte al proyecto por su enfoque principal en explorar la viabilidad de controlar las herramientas quirúrgicas de forma remota ya que el proyecto en cuestión no tocará dicho escenario.
Live delivery of neurosurgical operating theater experience in virtual reality	Los autores indican que una alta calidad (4k) en la presentación de un video en formato estereoscópico limita considerablemente la sensación de realidad virtual, lo que no es deseable para un sistema.	Se descarta como aporte al proyecto por su relación a la reconstrucción y transmisión virtual a múltiples estudiantes para evaluar la interacción con una demostración en vivo de neurocirugía, ya que el enfoque del proyecto no tocará dicho escenario.

ARTÍCULO	BRECHA	APORTE
Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery	Los autores recomiendan para las cirugías remotas reales, llevar a cabo un gran desarrollo e investigación en interfaces hombre-máquina, retroalimentación háptica y visual, seguridad de la red, tecnologías de red futuras como 5G, para retroalimentación de video de alta definición y otros flujos de datos más exigentes que son necesarios para dichas cirugías.	Aporta al proyecto debido a su relación al escenario del proyecto en cuestión ya que está enfocado en analizar los requisitos de comunicación de un escenario crítico como una cirugía remota.
Medical Telerobotics and the Remote Ultrasonography Paradigm Over 4G Wireless Networks	Gran parte del potencial que existe para controlar un robot quirúrgico a distancia aún permanece sin explotar.	Se descarta como aporte al proyecto ya que está centrado en el análisis de los sistemas robóticos médicos de hoy en día y el enfoque del proyecto no tocará dicho análisis.
360ProbDASH: Improving QoE of 360 Video Streaming Using Tile-based HTTP Adaptive Streaming	Hace falta aplicar un modelo de prominencia para ayudar a la adaptación de la ventana gráfica con mayor precisión.	Se descarta como aporte al proyecto por su relación en mejorar la calidad de la transmisión adaptativa de la ventana gráfica basada en mosaicos probabilísticos, ya que el enfoque del proyecto no tocará dicho escenario.

ARTÍCULO	BRECHA	APORTE
Modeling QoE of Virtual Reality Video Transmission Over Wireless Networks	Se puede optimizar la transmisión de video 360 utilizando el modelo QoE planteado por los autores, ya que pueden ayudar a los proveedores a determinar cómo particionar y codificar el video 360, y servir como punto de referencia para que los operadores de red.	Aporta al proyecto ya que brinda una base de calificación de QoE basado en la transmisión de videos de 360 grados
A Subjective Study on QoE of 360 Video for VR Communication	El mareo cibernético es un gran problema para los videos 360, especialmente para los que tienen fuertes movimientos de cámara.	Aporta al proyecto ya que evalúa la QoE en la visualización de videos de 360° con respecto a ciertos factores como calidad perceptiva y aceptabilidad.
Subjective and Viewport-based Objective Quality Assessment of 360-degree videos	Hace falta analizar el rendimiento de las métricas estereoscópicas para videos de 360 grados que consideren diferentes distorsiones.	Se descarta como aporte al proyecto ya que está centrado en la evaluación de la calidad visual de video de 360° a través de HMD
An Evaluation of Quality Metrics for 360 Videos	Hace falta investigar las métricas de calidad objetivas para las ventanas gráficas, así como los impactos de los diferentes formatos de proyección en la calidad del video.	Se descarta como aporte al proyecto ya que las medidas tomadas en el artículo no se tendrán en cuenta en este proyecto.

Tabla 1: Aportes y brechas

Capítulo 3

Construcción del Escenario

3.1 Diseño del Escenario

El éxito del servicio de streaming de video se enfoca en que el usuario pueda desplegar, en su dispositivo, el contenido con un mínimo de fallas y retrasos. Para asegurar lo anterior, se debe realizar algunas tareas de gestión sobre la red, como el monitoreo y control del ancho de banda [59]. Los servicios basados sobre IP proporcionan un ancho de banda amplio, desde 768Kb hasta 2Mb dependiendo del tipo de conexión de los centros participantes ofreciendo una calidad en audio, vídeo y datos muy alta; la velocidad de conexión oscila entre 768Kbs hasta 4MBs [60].

La realización de un análisis de tráfico proporciona herramientas que ayudan a determinar el impacto de la implementación de nuevos servicios, además de la realización de pruebas en entornos controlados sin afectar el comportamiento de la red y de los usuarios [61].

Para el estudio del servicio de LVS en un proceso de Tele-Cirugía adaptando video 360° sobre redes 5G, se construyó en un escenario de experimentación por medio de una simulación, la cual estuvo conformada por tres elementos importantes, el primero encargado de emular la red 5G por medio de la cual se conectan los clientes y el servidor, el segundo elemento es el servidor que envía la transmisión de video de 360° a los clientes, y el último elemento es el cliente que se utilizará para la reproducción y monitorización de la información recibida.

El escenario simulado fue un caso hipotético de una sala quirúrgica, la cual permite realizar prácticas de Tele-Cirugía usando sistemas (robots) adaptados con una cámara de

video de 360°, en el servicio pueden conectarse diferentes usuarios finales remotos, los cuales reciben la transmisión de video de 360° en vivo de la cirugía, estos posibles usuarios son: Médico cirujano, encargado de controlar todas las funciones del robot para así efectuar correctamente la cirugía, como el caso del artículo en [62] que presenta un escenario de Tele-Cirugía sobre la cual se efectuó la operación de un peluche cuyo cirujano se encontraba operando por medio de un robot, ambos separados por 10 km de distancia. Médico de apoyo, su función es la de respaldar las labores ejecutadas por el médico cirujano mediante Telepresencia, tarea similar a la del estudio realizado en el artículo [63] en donde analizaron el uso de Realidad Mixta para mejorar la sensación de presencia social y permitir que dos usuarios remotos trabajen juntos. Paciente, el cual se encarga de emitir el video de 360°. En los estudios encontrados se trabajó con herramientas como brazos robóticos, dispositivos de Realidad Virtual/Aumentada (HTC Vive, Microsoft HoloLens, Samsung Gear, Oculus Rift), cámaras 360° (Ricoh Theta V, Nokia OZO), dispositivos Android y Computadores conectados con redes 4G.

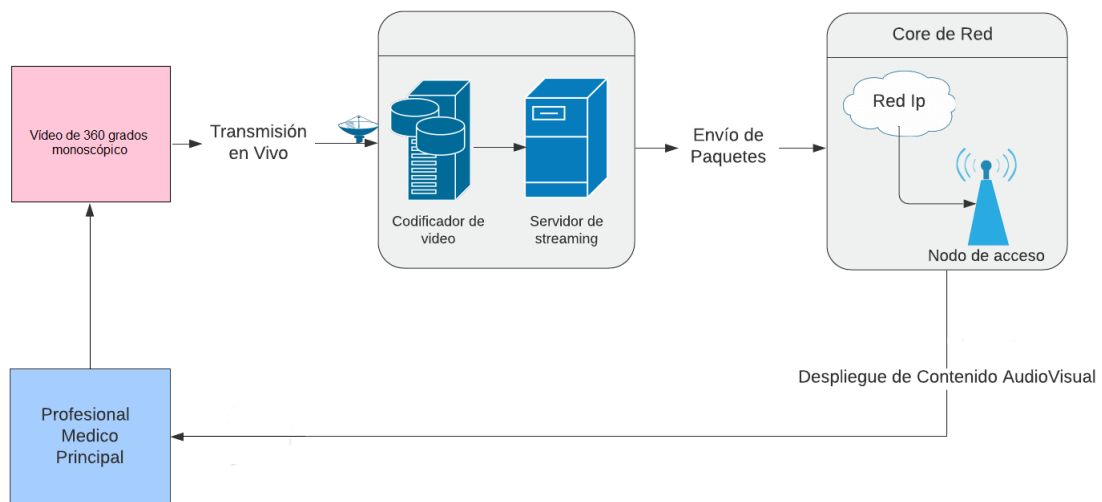


Figura 5: Diagrama de contexto

La Figura 5 muestra la infraestructura del escenario simulado, en ella se identifican los componentes principales para proporcionar servicio de streaming de video, los cuales son: codificador de video, servicio de streaming, core de red y red de usuarios. Una vez se empiece a transmitir el video, los contenidos se codifican y almacenan en una base de datos

multimedia para luego ponerse a disposición de un servidor de streaming. El contenido se divide en varios paquetes y se transmiten a través del core de red, finalmente los usuarios acceden a dicho contenido en sus dispositivos por medio del nodo de acceso.

3.2 Implementación del Escenario

3.2.1 Configuración del simulador, servidor y cliente

De acuerdo a los hallazgos analizados de los diferentes simuladores de red 5G expuestos en el capítulo 2, se presenta a continuación, los detalles referentes a la configuración exitosa del simulador escogido, así como los detalles de configuración del servidor y cliente. Cabe resaltar que las herramientas utilizadas en este trabajo de investigación se escogieron principalmente porque son de código libre y de fácil acceso y adaptabilidad. El resumen de las experiencias obtenidas con las herramientas trabajadas, se encuentra en el Anexo A.

Para la simulación se utilizó Simu5G e INET ¹, INET Framework es una biblioteca de modelos de código abierto para el entorno de simulación OMNeT++. Proporciona protocolos, agentes y otros modelos para investigadores y estudiantes que trabajan con redes de comunicación. INET contiene modelos para la pila de Internet (TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP, etc.), protocolos de capa de enlace alámbricos e inalámbricos (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, etc.) [64].

Simu 5G es una biblioteca de simulación de eventos discretos para redes 5G New Radio basada en OMNeT++. Incluye una colección de modelos con interfaces bien definidas, que se pueden instanciar y conectar para construir escenarios de simulación arbitrariamente complejos, y es totalmente compatible con la biblioteca INET, que permite simular escenarios de extremo a extremo que involucran arbitrariamente redes TCP/IP complejas que incluyen interfaces de capa 2 5G 'NR. En particular, Simu5G modela el plano de datos de la RAN 5G (rel. 16) y la CN [65]. Además, permite la simulación de Comunicaciones 5G en los modos Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y Duplexación por división de Tiempo (TDD), con BS heterogéneos (macro, micro, pico, etc.), posiblemente

¹INET es el nombre que los creadores le dieron a esta librería

comunicándose a través de la interfaz X2 para admitir el traspaso y la coordinación de interferencia entre celdas [18].

La instalación de Simu5G se realizó descargando las carpetas de Simu5G e Inet desde la máquina virtual (plug and play) encontrada en la página [Simu5G Plug-and-Play](#), de esta manera se pudo ejecutar la simulación mediante la terminal de Ubuntu y enviar paquetes de datos a través de la red 5G. La guía de instalación de Simu5G sobre Ubuntu 20.04 se encuentra en el Anexo B.

El escenario a simular se observa en la Figura 6, consta de un UE conectado a una BS, un UPF, un enrutador de Traducción de Direcciones de Red (NAT), un router, un servidor externo (real), cada uno representado con las direcciones IP reflejadas en la figura.



Figura 6: Diseño simulación en Simu5G

Para el proceso de la configuración del servidor, se decidió trabajar con Wowza que es un software de servidor de medios sólido y personalizable que impulsa la transmisión confiable de video y audio de alta calidad a cualquier dispositivo, en cualquier lugar. El software Wowza ofrece componentes potentes para adaptar los flujos de trabajo de transmisión con confianza. Es independiente de la plataforma, multiformato y multipantalla. Admite cualquier formato de video, lo transcodifica una vez y lo entrega de manera confiable en múltiples formatos y con la mejor calidad posible a cualquier dispositivo conectado, en cualquier lugar [66]. Wowza posee muchas herramientas para lograr generar aplicativos

de video como VoD y LVS desde alguna cámara WEB o IP, y usar diversas técnicas de streaming como DASH, Protocolo de Transmisión en Tiempo Real (RTSP), Protocolo de Mensajería en Tiempo Real (RTMP), entre otros [61].

También se trabajó con OBS Studio, que es una aplicación de código abierto que permite tanto la grabación como la transmisión de audio y video en tiempo real (streaming) [67]. Se puede usar para grabar presentaciones, sesiones de captura de pantalla, juegos de eSports y mucho más, viene con configuraciones preestablecidas para la transmisión en YouTube, Twitch y Facebook, pero se puede usar para cualquier plataforma de transmisión que use RTMP personalizado. OBS ofrece a los usuarios capacidades avanzadas de producción de video en vivo a través de una interfaz fácil de usar que puede satisfacer las necesidades de la mayoría de las producciones de video [68]. La configuración de Wowza y OBS se pueden encontrar en los anexos C y D.

Y para el cliente, se trabajó con VLC media player que es un reproductor multimedia, libre y de código abierto. Se realizó la configuración con el protocolo RTSP, teniendo en cuenta que las transmisiones de los paquetes de datos se hacen a través del protocolo UDP, el cual es el protocolo utilizado para la transmisión de videos en vivo por su falta de retrasos en la retransmisión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de estos tipos y es ideal para usar con el protocolo de transmisión RTSP [69].

Las características del PC utilizado para la simulación son las expuestas en la Tabla 2:

PC	Características	Sistema Operativo	Software
PC-1	Procesador Ryzen 5600X, 16G de RAM, tarjeta gráfica Nvidia RTX 3060, codificador NVENC	Linux Ubuntu 20.04 LTS	Simu5G, Wowza Streaming, OBS Studio, VLC

Tabla 2: Características del PC utilizado

A continuación, se evidencia la simulación en funcionamiento enviando un video de 360 grados monoscópico con OBS y Wowza, pasando por la red Simu5G y llegando al cliente que recupera el video a través de VLC.



Figura 7: Prueba de funcionamiento de la simulación

Capítulo 4

Verificación de los puntos umbrales

4.1 Parámetros

Para la verificación de los puntos umbrales del escenario simulado, se debe tener en cuenta la gestión de recursos de NR que Simu5G admite, así como la gestión de la tasa de bits que la herramienta OBS Studio permite para hacer una transmisión adecuada.

Con respecto a Simu5G, son [70]:

- Agregación de portadores (CA): El módulo global carrierAggregation almacena toda la información relacionada con los Portadores de componentes (CC) empleados en la red. Incluye un vector de N submódulos ComponentCarrier, cuya frecuencia portadora se puede configurar a través de NED/INI.
- Diferentes numerologías: Un índice numerológico define la duración del intervalo y los UE se programan en intervalos. En Simu5G se puede asociar una numerología diferente a cada CC y configurarla vía NED/INI. Los gNB y los UE se pueden limitar solo a un subconjunto de numerologías.
- FDD/TDD: Simu5G es compatible con FDD y TDD. En FDD, cada CC tiene porciones separadas para espectros con Relación de Enlace Ascendente (UL) y Relación de Enlace Descendente (DL). En lo que respecta a TDD, NR prevé 62 posibles formatos de ranura (3GPP - TR 38.213), donde los símbolos individuales en una ranura pueden ser DL, UL o flexibles (es decir, pueden asignarse dinámicamente a transmisiones DL o UL, o mantenerse inactivos). En Simu5G se modelaron los formatos

de ranura TDD como propiedades del CC y fueron asociados a los submódulos del ComponentCarrier.

Con respecto a OBS Studio, se debe tener en cuenta la Tabla 3 que corresponde a la tasa de bits que recomienda la herramienta según la calidad deseada para el video [71]:

Calidad	Calidad de resolución	Tasa de bits de video
BAJA	480 X 270	400kbps
MEDIA	640 X 360	800 - 1200kbps
ALTA	960 X 540/854 X 480	1200 - 1500kbps
HD	1280 x 720	1500 - 4000kbps
HD1080	1920 x 1080	4000 - 8000kbps
4K	3840 X 2160	8000- 14000kbps

Tabla 3: Tasas de bits recomendadas para OBS Studio

De acuerdo a lo nombrado anteriormente, se definen a continuación los parámetros que se manejarán en este proyecto para lograr modificar las condiciones de la red, las condiciones del servidor y así poder encontrar los puntos umbrales del escenario expuesto.

4.1.1 Bitrate y codificación

La tasa de bits (bitrate) se refiere a la tasa a la que se procesan o transfieren los datos. Por lo general, se mide en segundos, desde bps para valores más pequeños hasta Kbps y Mbps. En redes y telecomunicaciones digitales, el bitrate se refiere a la medición por segundo de los datos que pasan a través de una red de comunicaciones. En este contexto, bitrate es sinónimo de tasa de transferencia de datos. Para la codificación multimedia, el bitrate se refiere a la cantidad de bits utilizados por unidad de tiempo de reproducción, como video o audio después de la compresión (codificación). El tamaño multimedia y la calidad de salida a menudo dependen de la tasa de bits usada durante la codificación [72].

Si elige una tasa de bits mayor que el ancho de banda disponible de la red, el video se

congelará en medio de la reproducción, ya que la velocidad a la que se reproduce supera la velocidad a la que se puede descargar. Estas congelaciones de video se denominan *rebuffers* y reproducir el video continuamente sin *rebuffers* es un factor clave en la QoE percibida por el usuario [73]. Para el proyecto se usará el término de bitrate enfocado a la codificación multimedia, específicamente en codificación del video de 360 grados.

H.264 es actualmente uno de los estándares de codificación de video más utilizados, ya que cubre una amplia gama de aplicaciones como videoconferencia, servicios móviles y almacenamiento de video HD. H.265 es su sucesor y su objetivo es lograr la misma calidad de video a tasas de bits más bajas. H.264 y H.265 representan aproximadamente el 90 por ciento de la transmisión y compresión de video digital global en el mercado actual [74].

Para una calidad de compresión aceptable con codificación H.264/AVC se tiene: El bitrate promedio de 2 Mbps o superior proporciona una calidad de video percibida como “Justa”. El bitrate promedio de 5 Mbps o superior proporciona una calidad de video percibida como “Buena”. El bitrate promedio de 15 Mbps o superior proporciona una calidad de video percibida como “Excelente” [75].

Para una calidad de compresión aceptable con codificación HEVC se tiene: El bitrate promedio de 1 Mbps o superior proporciona una calidad de video percibida “Buena”. El bitrate promedio de 5 Mbps o superior proporciona una calidad de video percibida como “Excelente” [75].

4.1.2 Frecuencia

Si bien las capas física y superior están diseñadas como independientes de la frecuencia, se especifican dos requisitos de rendimiento de radio independientes para dos rangos de frecuencia (FR), a saber, FR1 y FR2. FR1 está por debajo del rango de 7 GHz (410 - 7125 MHz) y FR2 es el rango de ondas milimétricas (24250 - 52600 MHz) [76] como se muestra en la Tabla 4.

Frequency range	Frequency range	Supported channel bandwidth [MHz]
FR1	410 MHz – 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

Tabla 4: Frecuencia y Ancho de banda del canal NR

[76]

Se especifican cuatro tipos de bandas para NR:

- Banda LTE “refarming”: Las bandas tienen las correspondientes bandas LTE. Por ejemplo, la banda n7 de NR corresponde a la banda 7 de LTE. Por lo tanto, es probable que las bandas se utilicen “reorganizando” (es decir, reutilizando) las bandas LTE existentes.
- Nuevas bandas NR en FR1: Bandas de frecuencia completamente nuevas para NR en FR1 cuyas bandas LTE correspondientes no existen.
- NR nuevas bandas en FR2: nueva banda de frecuencia para NR en FR2.
- Banda suplementaria de enlace ascendente (SUL) / enlace descendente (SDL): estas bandas solo tienen frecuencia de enlace ascendente/descendente y se pueden implementar con otro tipo de bandas NR [76].

NR está diseñado para operar en las bandas operativas FR2 definidas en la Tabla 5.

Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F_{UL_low} – F_{UL_high}	F_{DL_low} – F_{DL_high}	
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n259	39500 MHz – 43500 MHz	39500 MHz – 43500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD
n262	47200 MHz – 48200 MHz	47200 MHz – 48200 MHz	TDD

Tabla 5: Bandas operativas NR en FR2

[77]

4.1.3 Numerología

NR utiliza una estructura de marco flexible, con diferentes espaciamentos de subportadoras (SCS). El SCS es la distancia entre los centros de dos subportadoras consecutivas, y los posibles valores de SCS son (en KHz): 15; 30; 60; 120 y 240. Esto se conoce como “numerologías múltiples”. En cuanto al dominio del tiempo, se divide en tramas de radio de 10 ms, cada una de las cuales consta de 10 subtramas de 1 ms cada una, como se muestra en la imagen a continuación [76].

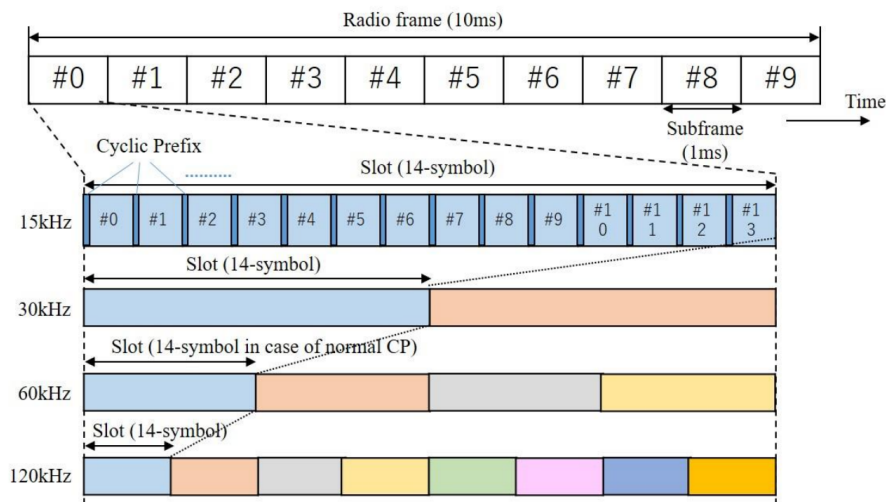


Figura 8: Estructura de marco en NR

[77]

A su vez, cada subtrama consta de 1/2/4/8/16 ranuras -mostradas en diferentes colores- según el SCS/numerología seleccionado. La Figura 8 muestra los casos de valores SCS de 15; 30; 60 y 120 KHz, mientras que la siguiente tabla proporciona la lista completa de posibles numerologías en NR. Como se muestra en la Figura 8 y Tabla 6 para el caso de 15 kHz, cada ranura consta de 14 símbolos OFDM (independientemente del SCS) precedidos por un prefijo cíclico (CP) [76].

Cyclic Prefix	subcarrier spacing (SCS) [kHz]	Number of subframes per radio frame	Number of slots per subframe	Number of OFDM symbols per slot	Applicable frequency range
normal	15	10	1	14	FR1
normal	30	10	2	14	FR1
normal	60	10	4	14	FR1 and FR2
extended	60	10	4	12	FR1 and FR2
normal	120	10	8	14	FR2
normal	240	10	16	14	FR2

Tabla 6: Numerologías múltiples en NR

[77]

4.1.4 Ancho de banda

En NR, el ancho de banda máximo de una portadora NR es de 100 MHz para FR1 y 400 MHz para FR2, respectivamente. Para lograr un ancho de banda más amplio, se admite además la agregación de portadoras (CA) de hasta 16 portadoras NR. Se admiten tanto CA dentro de una banda de frecuencia (CA intrabanda) como CA entre bandas de frecuencia (CA interbanda). Para el caso de CA interbanda, también se admite CA con diferentes numerologías, por ejemplo, CA entre portadora NR en FR1 y portadora NR en FR2 [77].

La configuración de ancho de banda de transmisión máxima NRB para cada ancho de banda de canal de UE y espaciado de subportadora se especifica en la Tabla 7.

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N _{RB}	N _{RB}	N _{RB}	N _{RB}
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

Tabla 7: Configuración de ancho de banda máximo de transmisión NRB para FR2

[77]

Los requisitos de esta especificación se aplican a la combinación de anchos de banda de canal, SCS y bandas operativas que se muestran en la Tabla 8. La configuración del ancho

de banda de transmisión se admitirá para cada uno de los anchos de banda de canal especificados. Los anchos de banda del canal se especifican tanto para la ruta Tx como para la Rx [77].

Operating band	SCS (kHz)	UE channel bandwidth (MHz)			
		50	100	200	400 ¹
n257	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
n258	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
n259	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
n260	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
n261	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
n262	60	50	100	200	
	120	50	100	200	400
NOTE 1: This UE channel bandwidth is optional in this release of the specification.					
NOTE 2: For RedCap UEs, the maximum channel bandwidth is 100MHz					

Tabla 8: Anchos de banda de canal para cada banda NR para FR2

[77]

Para ver las tablas mencionadas relacionadas con FR1, revisar la especificación 3GPP TS 38.101-1 V17.5.0

4.1.5 Codificación y Modulación Adaptativa (ACM)

ACM es una característica central en las redes celulares actuales. Es una tecnología que puede cambiar automáticamente la modulación y la corrección de errores de reenvío de un enlace para compensar los cambios en las condiciones del enlace. Por lo general, estos cambios se deben al clima, por ejemplo, el desvanecimiento de la lluvia, pero también pueden provenir de otras fuentes, como interferencias [78].

ACM optimiza el rendimiento en un enlace de datos inalámbrico, adaptando el orden de modulación y la tasa de código de corrección de errores de acuerdo con las condiciones de

ruido en el enlace [78]. En el sistema de comunicación móvil 5G, la estación base realiza la codificación y modulación adaptativa en función de la información del estado del canal proporcionada por el usuario y mejora la eficiencia del espectro al seleccionar diferentes combinaciones de tipos de modulación y tasas de código [79].

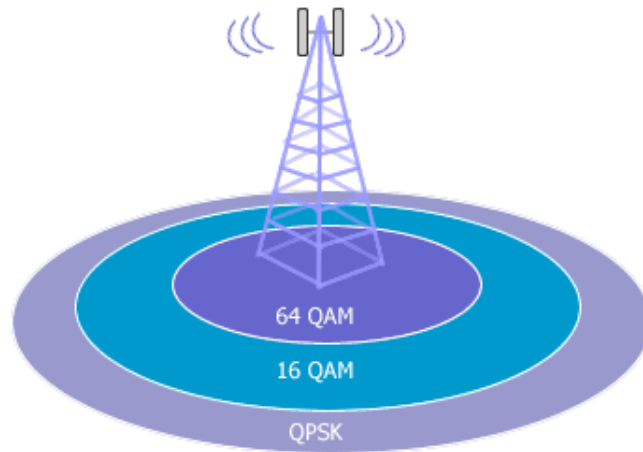


Figura 9: Codificación y Modulación Adaptativa
[80]

4.2 Modificación a los archivos de configuración de Simu5G

De acuerdo a los parámetros mencionados en la sección 4.1, se procede a hacer las modificaciones en los archivos de configuración de Simu5G que se encuentran en “simu5G / emulation / extclientserver”, desde la línea 58 a la línea 70 con respecto a numerología, frecuencia, ancho de banda y tipo de duplexación, para ajustar las condiciones de la red a las necesidades del escenario expuesto y poder encontrar los puntos umbrales.

La Figura 10 muestra un fragmento de código como inicialmente vino configurado Simu5G. Inicialmente, el módulo carrierAggregation se configuró con un CC estableciendo el parámetro numComponentCarriers en 1, como se evidencia en la línea 57. En la línea 58, se estableció el vector componentCarrier con índice 0 (es decir, que va a seleccionar el primer componente del vector inicializado en la línea 57) donde se configuró numerologyIndex igual 0, carrierFrequency igual a 2GHz y numBands de 10, como se muestra en las siguientes líneas 58, 59 y 60, que hacen referencia al índice de la numerología, fre-

cuencia de la portadora y al número de bloques de recursos respectivamente. Se configuró el número de CC utilizados por BS y UE, estableciendo el parámetro numCarriers en 1, como se muestran en las líneas 62 y 64. Y el módulo channel-Model se asocia a CC con índice 0, configurando el parámetro componentCarrierIndex.

```

56 ##### CA configuration #####
57 *.carrierAggregation.numComponentCarriers = 1
58 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numerologyIndex = 0
59 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].carrierFrequency = 2GHz
60 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numBands = 10
61
62 *.gnb.cellularNic.numCarriers = 1
63 *.gnb.cellularNic.channelModel[0].componentCarrierIndex = 0
64 *.ue.cellularNic.numNRCarriers = 1
65 *.ue.cellularNic.nrChannelModel[0].componentCarrierIndex = 0
66

```

Figura 10: Archivo de configuración inicial omnetpp.ini de la carpeta extclientserver

```

56 ##### CA configuration #####
57 *.carrierAggregation.numComponentCarriers = 1
58 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].carrierFrequency = 39GHz
59 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numBands = ${rbs=66}
60 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numerologyIndex = ${u=3}
61 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].useTdd = true
62 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].tddNumSymbolsDl = 14
63 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].tddNumSymbolsUl = 0
64
65 *.gnb.cellularNic.numCarriers = 1
66 *.gnb.cellularNic.channelModel[0].componentCarrierIndex = 0
67 *.ue.cellularNic.numNRCarriers = 1
68 *.ue.cellularNic.nrChannelModel[0].componentCarrierIndex = 0
69
70 *.channelControl.propagationModel = "NakagamiModel"
71

```

Figura 11: Archivo de configuración modificado omnetpp.ini de la carpeta extclientserver

En la Figura 11 se presenta los cambios que se hicieron en el código de Simu5G para propósitos del trabajo de investigación. Se hicieron variaciones de carrierFrequency, numBands y numerologyIndex, como se evidencian en las líneas 58, 59 y 60. Se agregaron nuevos parámetros, como duplexación TDD igual a true en la línea 61, significando que se va a implementar duplexación por división de tiempo con tddNumSymbolsDl igual a

14 y `tddNumSymbolsUl` igual a 0, como se muestra en las líneas 62 y 63. Se elige el modo Dúplex TDD, ya que se utilizará una sola banda de frecuencia para transmitir DL con un formato de ranura 0 lo que tendrá 14 símbolos para transmisión DL únicamente, esto debido a que es una transmisión de un servicio de LVS y el cliente no necesita enviar información al servidor. Además, se agregó un nuevo módulo `channelControl`, en la línea 70, configurando `propagationModel` con el modelo de Nakagami, dicho módulo por defecto estaba configurado con el modelo de espacio libre. Se hizo este cambio, ya que el modelo de Nakagami es utilizado ampliamente en la literatura, lo que demuestra su pertinencia para estimar las condiciones de propagación en escenarios interiores y exteriores con la presencia de desvanecimiento [61].

4.3 Pruebas

Para la realización de las pruebas se tuvo en cuenta los videos de 360° monoscópicos, los cuales se visualizan como representaciones planas de las imágenes de 360° sin una percepción de profundidad real. Los reproductores de video 360 como Cyberlink PowerDVD 20 y 5kPlayer se usan comúnmente para ver videos monoscópicos [81].

Parámetro	Valor
Modo Duplér	TDD
Dirección de transmisión	Enlace descendente
Escenario	Interior
Frecuencias	Relacionadas a TDD
Ancho de Banda	50 MHz y 100 MHz
índices de numerología	2 para FR1 y 3 para FR2
Modelo de propagación	Nakagami
Modulación	ACM
Potencia de transmisión gNB	46 dBm

Posición gNB (x,y)	450 m, 300 m
Posición UE (x,y)	450 m, 350 m

Tabla 9: Restricciones del Escenario

Se establecieron los principales parámetros de configuración en la Tabla 9 donde se tiene una dirección de transmisión con enlace descendente, ya que el cliente solo consumirá el servicio de LVS, se elige un modo Dúplex TDD y el modelo de propagación Nakagami, debido a lo expuesto en la sección 4.2, la modulación, la potencia de transmisión y las posiciones de BS y UE ya se encontraban por defecto en Simu5G.

Junto con los parámetros a modificar mencionados anteriormente y resaltando la necesidad de potenciar una comunicación ultra confiable y de baja latencia como las especificaciones que brinda URLLC y altas velocidades de datos como específica eMBB. Es necesario tener en cuenta los factores contribuyentes para implementar servicios de estos tipos, por ejemplo: selección de espectro adecuado para cobertura y capacidad [23], mencionados en el capítulo 2.

Las frecuencias escogidas estuvieron en el rango de banda media (por debajo de 7 GHz), que es el punto óptimo para las implementaciones de 5G, ya que tiene un mayor ancho de banda y capacidad en comparación con la banda baja, y las frecuencias en el rango de la onda milimétrica o banda alta (por encima de 24 GHz), ya que ofrece velocidades máximas sin precedentes y baja latencia. Fueron seleccionadas las numerologías 2 y 3, teniendo en cuenta que los SCS grandes son ideales para reducir la latencia [82] y anchos de banda de 50MHz y 100MHz.

Las transmisiones fueron realizadas con un video de 3 minutos, donde inicialmente se hicieron variaciones con respecto a frecuencias, numerologías y ancho de banda con un bitrate de 3000 Kbps calidad HD. Luego, se repite el mismo procedimiento para un bitrate de 5000 Kbps calidad HD 1080 y 9000 kbps calidad 4K, según Tabla 3.

Las tablas de resultados evidencian las pérdidas de paquetes obtenidos para cada frecuencia, numerología y ancho de banda, para cada bitrate mencionado.

- Resultados de evaluación para bitrate de 3000 kbps

Con índice de numerología ($u = 2$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n77	3300 MHz – 4200 MHz	TDD	4 Ghz	1,739231356	2,295352229
n78	3300 MHz – 3800 MHz	TDD	3.7 Ghz	1,662991097	1,600393539
n79	4400 MHz – 5000 MHz	TDD	4.8 Ghz	1,444576418	1,422508124
n90	2496 MHz – 2690 MHz	TDD	2.6 Ghz	1,693194472	1,537036736

Tabla 10: Resultados con bitrate 3000 kbps, $u = 2$, SCS = 60.

Con índice de numerología ($u = 3$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n257	26500 MHz – 29500 MHz	TDD	28 Ghz	1,386967176	1,629166126
n258	24250 MHz – 27500 MHz	TDD	26 Ghz	1,486227844	1,631947303
n259	39500 MHz – 43500 MHz	TDD	42 Ghz	1,580817641	1,425451201
n260	37000 MHz – 40000 MHz	TDD	39 Ghz	1,54610349	1,499824435
n261	27500 MHz – 28350 MHz	TDD	27 Ghz	1,495701912	1,677410974
n262	47200 MHz – 48200 MHz	TDD	47 Ghz	1,434660233	1,600118163

Tabla 11: Resultados con bitrate 3000 kbps, $u = 3$, SCS = 120.

- Resultados de evaluación para bitrate de 5000 kbps

Con índice de numerología ($u = 2$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n77	3300 MHz – 4200 MHz	TDD	4 Ghz	4,181494662	3,312854135
n78	3300 MHz – 3800 MHz	TDD	3.7 Ghz	3,277777195	3,584955425
n79	4400 MHz – 5000 MHz	TDD	4.8 Ghz	3,492706821	3,44949376
n90	2496 MHz – 2690 MHz	TDD	2.6 Ghz	3,100136305	2,968055909

Tabla 12: Resultados con bitrate 5000 kbps, $u = 2$, SCS = 60.

Con índice de numerología ($u = 3$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n257	26500 MHz – 29500 MHz	TDD	28 Ghz	3,120502916	2,992304711
n258	24250 MHz – 27500 MHz	TDD	26 Ghz	3,035933871	3,496766903
n259	39500 MHz – 43500 MHz	TDD	42 Ghz	3,575021444	3,272007701
n260	37000 MHz – 40000 MHz	TDD	39 Ghz	3,489496446	3,022316923
n261	27500 MHz – 28350 MHz	TDD	27 Ghz	4,267182203	3,211062254
n262	47200 MHz – 48200 MHz	TDD	47 Ghz	3,425386423	3,540727319

Tabla 13: Resultados con bitrate 5000 kbps, $u = 3$, SCS = 120.

- Resultados de evaluación para bitrate de 9000 kbps

Con índice de numerología ($u = 2$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n77	3300 MHz – 4200 MHz	TDD	4 Ghz	14,40945645	16,06850716
n78	3300 MHz – 3800 MHz	TDD	3.7 Ghz	15,32324254	14,82208589
n79	4400 MHz – 5000 MHz	TDD	4.8 Ghz	14,43687321	15,61433877
n90	2496 MHz – 2690 MHz	TDD	2.6 Ghz	15,3257419	14,58906123

Tabla 14: Resultados con bitrate 9000 kbps, $u = 2$, SCS = 60.

Con índice de numerología ($u = 3$)

Banda	Banda operativa de enlace descendente (DL) BS transmitir/UE	Modo Dúplex	Frecuencia seleccionada	Packet Loss (%) con BW (50 MHz)	Packet Loss (%) con BW (100 MHz)
n257	26500 MHz – 29500 MHz	TDD	28 Ghz	16,14788884	15,8588593
n258	24250 MHz – 27500 MHz	TDD	26 Ghz	16,08312557	15,47115575
n259	39500 MHz – 43500 MHz	TDD	42 Ghz	15,20670286	15,84736642
n260	37000 MHz – 40000 MHz	TDD	39 Ghz	16,23222149	14,58906123
n261	27500 MHz – 28350 MHz	TDD	27 Ghz	13,98173688	15,38792937
n262	47200 MHz – 48200 MHz	TDD	47 Ghz	14,46483474	15,22701087

Tabla 15: Resultados con bitrate 9000 kbps, $u = 3$, SCS = 120.

Se presentan a continuación los resultados de los datos sacados para cada bitrate, de forma gráfica.

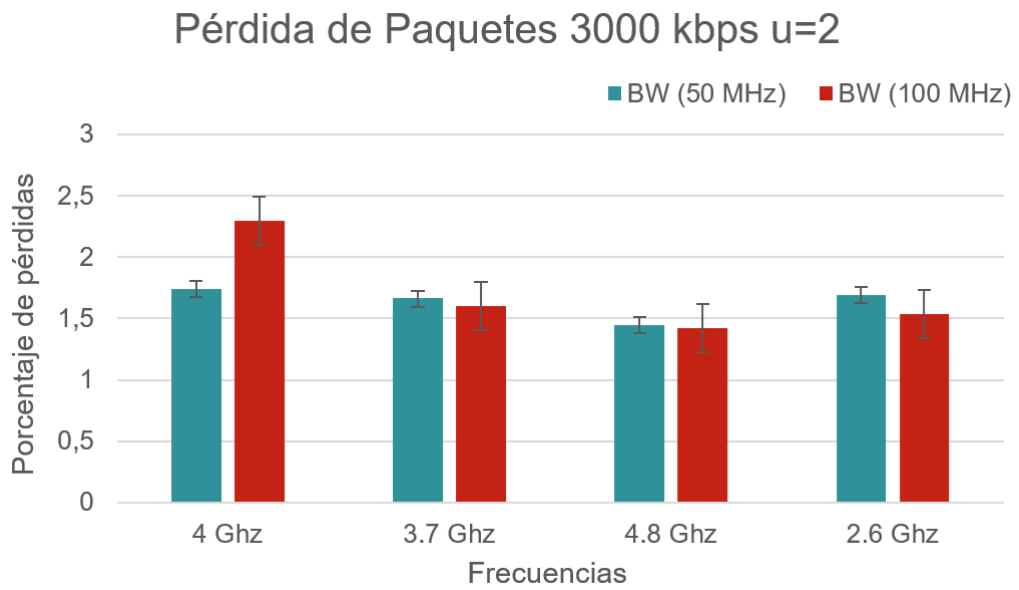


Figura 12: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 3000 kbps y $u = 2$

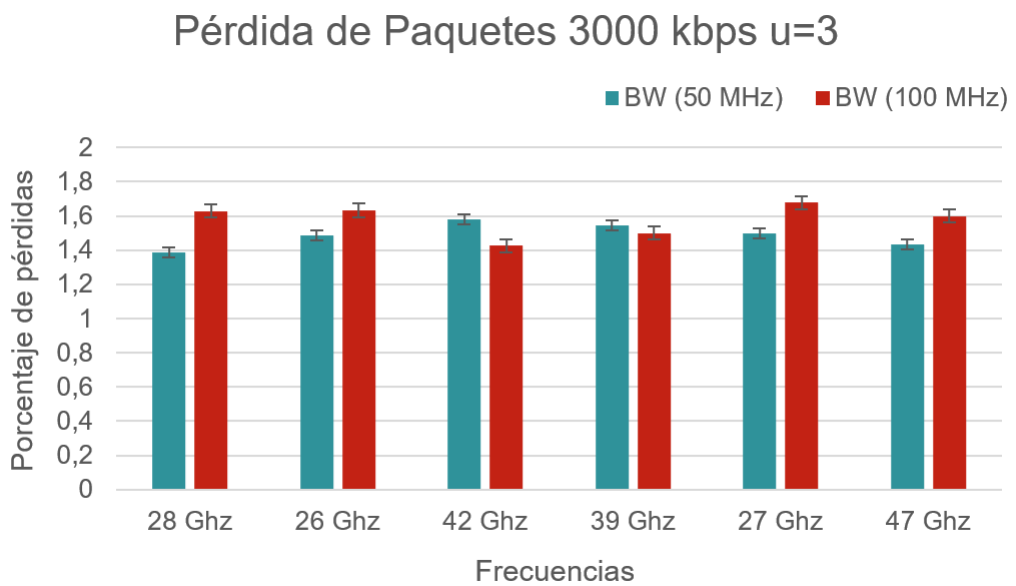


Figura 13: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 3000 kbps y $u = 3$

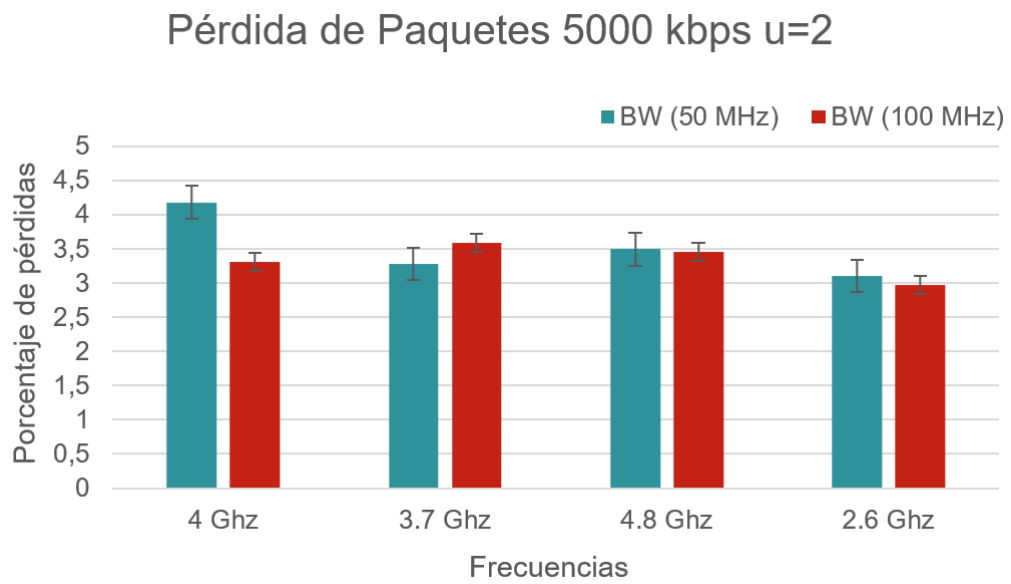


Figura 14: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 5000 kbps y $u = 2$

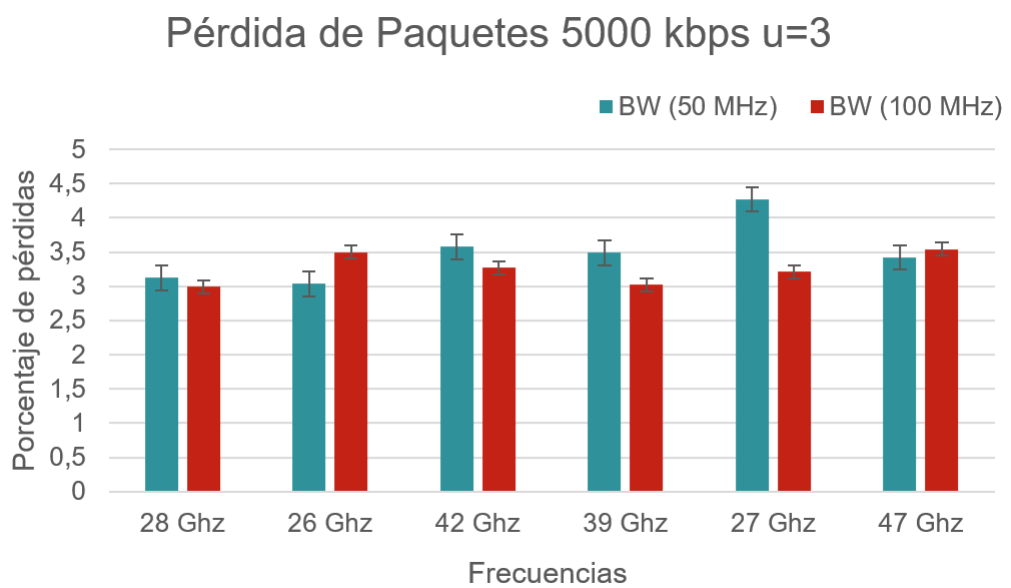


Figura 15: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 5000 kbps y $u = 3$

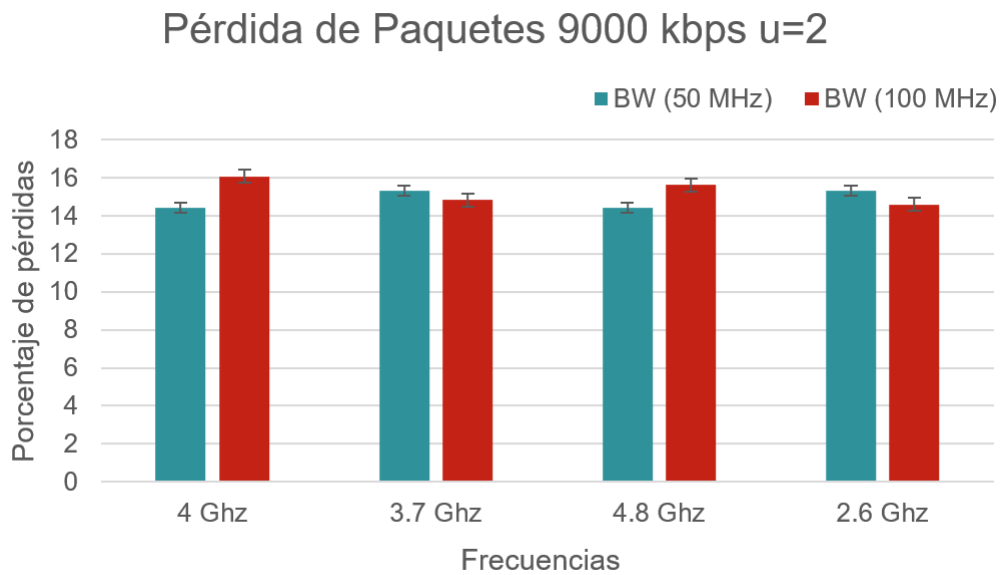


Figura 16: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 9000 kbps y $u = 2$

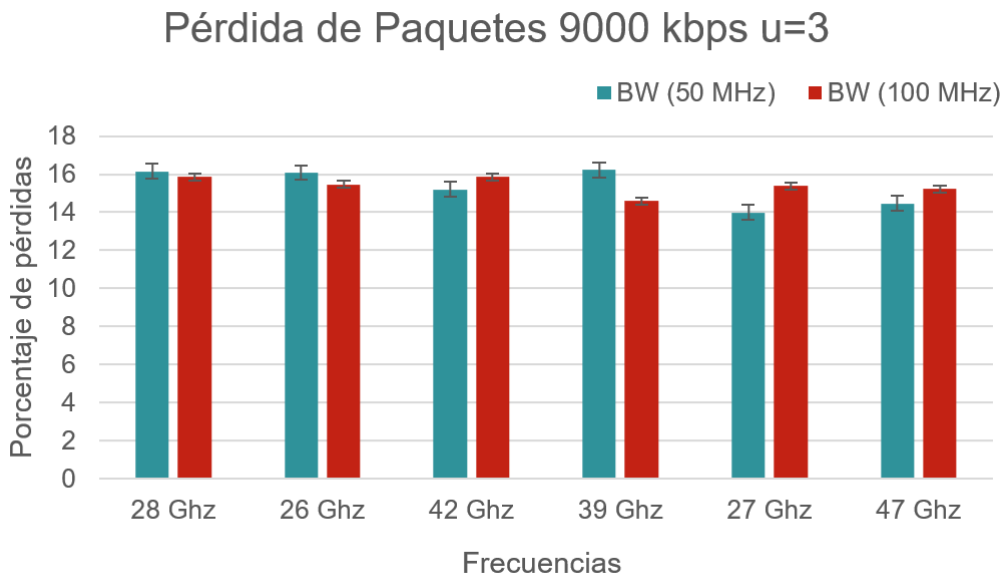


Figura 17: Resultado de pérdida de paquetes con bitrate 9000 kbps y $u = 3$

Según los resultados obtenidos de las gráficas, se puede apreciar que entre mayor bitrate, mayores son las pérdidas de paquetes tanto para un ancho de banda de 50 MHz y 100 MHz. Para las figuras 12 y 13, las cuales tiene un bitrate de 3000 Kbps, pero con diferente numerología, se obtuvieron unas pérdidas aproximadas entre 1.4% y 1.7%. Las figuras

14 y 15 que presentan un bitrate de 5000 Kbps, muestran unas pérdidas entre 3% y 4%. Finalmente, las figuras 16 y 17, que presentan un bitrate de 9000 Kbps, evidencian unas pérdidas entre 14% y 16%.

Sin embargo, no se encontró una diferencia significativa al modificar frecuencias, anchos de banda y numerología, por lo que se asume que los parámetros de la red son suficientes para llevar este tipo de tráfico al destino.

Por otro lado, se evidencian a continuación los resultados de algunas fracciones del video cuando llega al UE, obtenidas de VLC, donde se puede apreciar las diferencias entre cada imagen de acuerdo al bitrate dado. En la Figura 18, donde se trabajó con una frecuencia de 42 GHz, índice de numerología de 3 y un bitrate de 3000 Kbps, se evidencia que la imagen presenta una buena calidad sin pérdidas visibles. En la Figura 19, donde se trabajó con una frecuencia de 42 GHz, índice de numerología de 3 y un bitrate de 5000 Kbps, se aprecian las pérdidas de la transmisión, ya que la imagen muestra varias distorsiones. Y la Figura 20, que presenta una transmisión con una frecuencia de 42 GHz, índice de numerología de 3 y un bitrate de 9000 Kbps, muestra una imagen de muy mala calidad, donde el contenido del video se pierde totalmente.

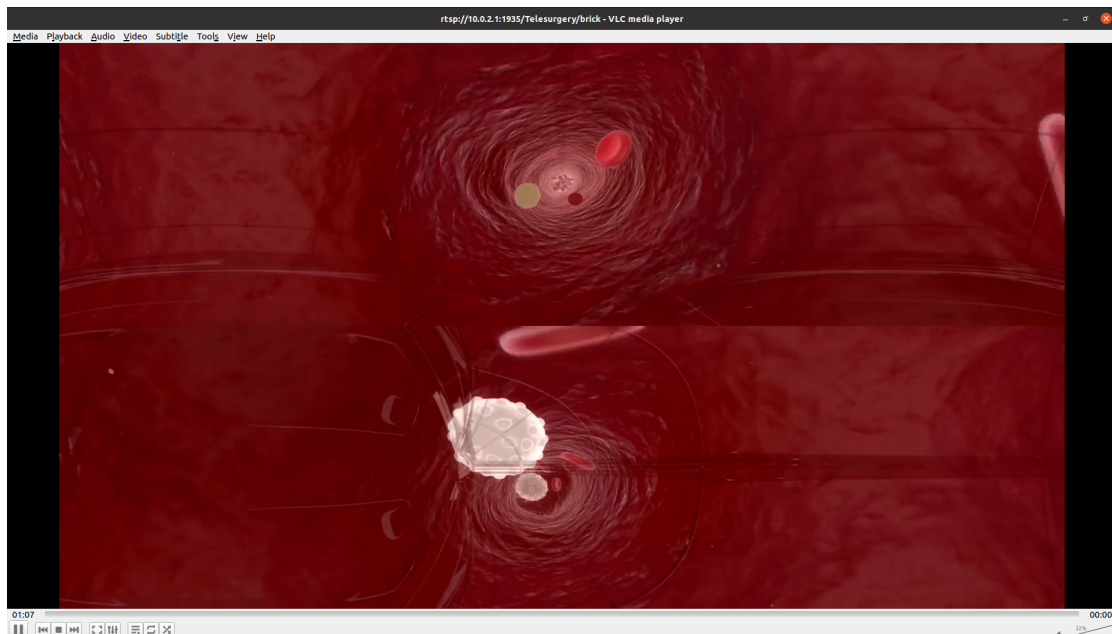


Figura 18: Resultado con Frecuencia de 42 GHz, μ de 3 y bitrate de 3000 kbps

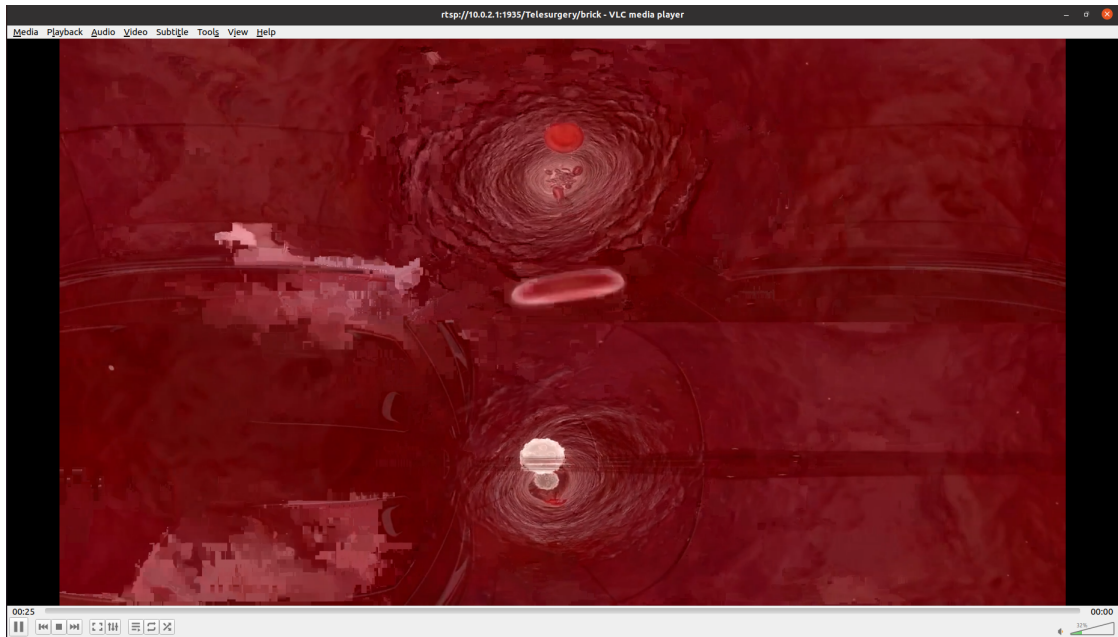


Figura 19: Resultado con Frecuencia de 42 GHz, u de 3 y bitrate de 5000 kbps

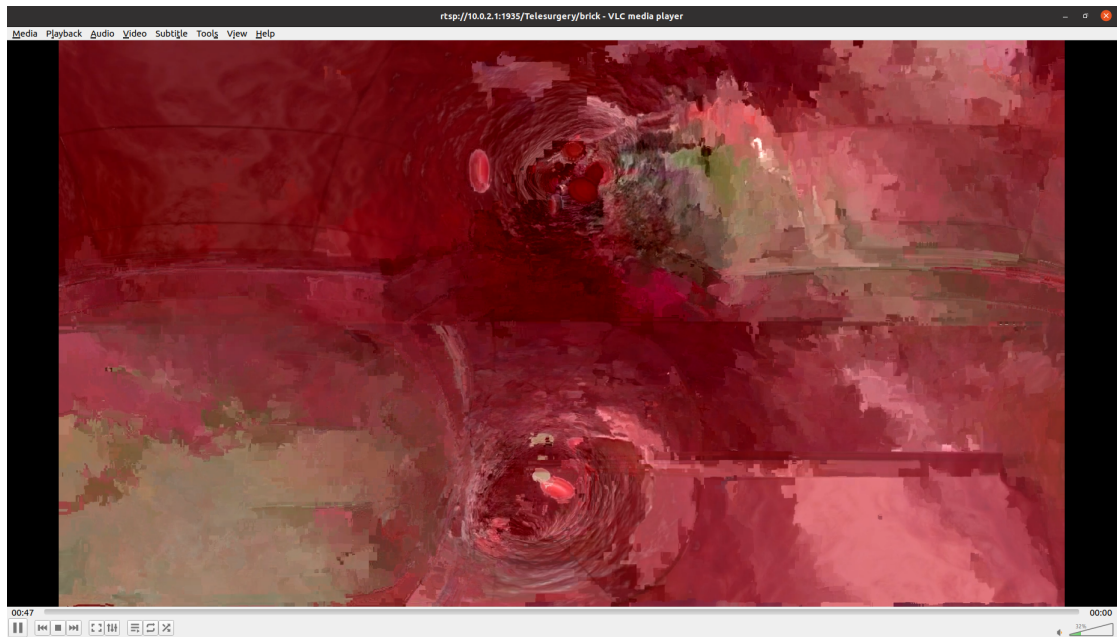


Figura 20: Resultado con Frecuencia de 42 GHz, u de 3 y bitrate de 9000 kbps

La recuperación de los videos se hizo con el protocolo RTSP como se mencionó en la sección 3.2.1, pero haciendo algunas pruebas como transmitir el video sin pasar por la red, usando únicamente Wowza, OBS Studio y VLC, y variando el bitrate, a bitrates altos, aproximadamente a 50.000 kbps, se pudo observar que no había diferencias con la calidad de video, es decir, que aún sin pasar por la red el video que se recupera en VLC tiene

pérdidas de paquetes y pixelaciones, similar a las que se observan en una transmisión con bitrates bajos pero pasando por la red simulada. Por otro lado, se hicieron las mismas pruebas, pero cambiando el protocolo a RTMP y se observó que el video se recupera correctamente, sin pérdidas de paquetes ni pixelaciones, pero al intentar recuperar el video con el protocolo RTMP y pasando por la red, el video nunca se visualiza. Analizando el tráfico con Wireshark, se observó el siguiente hallazgo en el servidor y cliente.

```

Info
46994 → 1935 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1 TSval=1092856699 TSecr=0 WS=128
1935 → 46994 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=63712 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1 TSval=2454899677 TSecr=1092856699 WS=1
46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=0 TSval=1092856703 TSecr=2454899677
[TCP Previous segment not captured] 46994 → 1935 [PSH, ACK] Seq=1449 Ack=1 Win=64256 Len=89 TSval=1092856727 TSecr=2454899677
[TCP Dup ACK #2#1] 1935 → 46994 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=63712 Len=0 TSval=2454899704 TSecr=1092856703 SLE=1449 SRE=1538

```

Figura 21: Error en Wireshark con RTMP en el servidor

La Figura 21 es una advertencia que significa que el paquete no se encontró cuando se estaba haciendo el rastreo y en la Figura 22 se resalta que el host de destino es inalcanzable debido a que un segmento TCP se ha perdido en su camino hacia el destino.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.00...	fe80::5c62:...	ff02::2	ICMP...	70	Router Solicitation from 5e:62:c5:39:8b:5f
2	1.26...	192.168.3.2	224.0.0.251	MDNS	183	Standard query 0x0000 PTR _nfs._tcp.local, "QM" question PTR _ipp._tcp.local, "QM" question PTR _ipps._tcp.local, "Q...
3	1.79...	fe80::38d8:...	ff02::2	ICMP...	70	Router Solicitation from 3a:d8:f8:29:f2:ec
4	3.13...	fe80::38d8:...	ff02::fb	MDNS	203	Standard query 0x0000 PTR _nfs._tcp.local, "QM" question PTR _ipp._tcp.local, "QM" question PTR _ipps._tcp.local, "Q...
5	4.00...	3a:d8:f8:29:...	Broadcast	ARP	42	Who has 10.0.2.1? Tell 192.168.3.2
6	4.00...	0a:aa:00:00:...	3a:d8:f8:2...	ARP	46	10.0.2.1 is at 0a:aa:00:00:00:04
7	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	74	46994 → 1935 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1 TSval=1092856699 TSecr=0 WS=128
8	4.00...	10.0.2.1	192.168.3.2	TCP	78	1935 → 46994 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=63712 Len=0 MSS=1460 SACK_PERM=1 TSval=2454899677 TSecr=1092856699 WS=1
9	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	66	46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=0 TSval=1092856703 TSecr=2454899677
10	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	RTMP	1603	Handshake C0+C1
11	4.00...	192.168.3.1	192.168.3.2	ICMP	74	Destination unreachable (Fragmentation needed)
12	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	155	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [PSH, ACK] Seq=1449 Ack=1 Win=64256 Len=89 TSval=1092856727 TSecr=2454899677
13	4.03...	10.0.2.1	192.168.3.2	TCP	82	[TCP Dup ACK #1] 1935 → 46994 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=63712 Len=0 TSval=2454899704 TSecr=1092856703 SLE=1449 SRE=1538
14	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092856939 TSecr=2454899704
15	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092857375 TSecr=2454899704
16	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092850200 TSecr=2454899704
17	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092859931 TSecr=2454899704
18	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092863455 TSecr=2454899704
19	16.8...	fe80::5c62:...	ff02::2	ICMP...	70	Router Solicitation from 5e:62:c5:39:8b:5f
20	17.2...	192.168.3.2	224.0.0.251	MDNS	183	Standard query 0x0000 PTR _nfs._tcp.local, "QM" question PTR _ipp._tcp.local, "QM" question PTR _ipps._tcp.local, "Q...
21	-165...	192.168.3.2	10.0.2.1	TCP	1514	[TCP Retransmission] 46994 → 1935 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64256 Len=1448 TSval=1092870367 TSecr=2454899704
22	19.1...	fe80::38d8:...	ff02::fb	MDNS	203	Standard query 0x0000 PTR _nfs._tcp.local, "QM" question PTR _ipp._tcp.local, "QM" question PTR _ipps._tcp.local, "Q...
23	20.9...	fe80::38d8:...	ff02::2	ICMP...	70	Router Solicitation from 3a:d8:f8:29:f2:ec

Figura 22: Error en Wireshark con RTMP en el cliente

Concluyendo entonces que, como el protocolo de transporte usado en la simulación es UDP, RTMP no es capaz de recuperar el video, ya que es estrictamente un protocolo basado en TCP, mientras que RTSP al usar ambos protocolos, depende de la transmisión confiable de TCP en el control y la entrega de mejores esfuerzos de UDP para mostrar audio y video en las aplicaciones del lado del cliente, antes de que llegue el archivo completo y así brindar una experiencia adecuada. Por lo tanto, para este escenario usando las herramientas de Simu5G y Wowza, la mejor opción para recuperar el video es usar RTSP.

Por otro lado, mientras se realizaban las pruebas con bitrates altos, pero pasando por

la red simulada, el video nunca se visualizaba en el lado del cliente y en Wireshark se evidenciaba la información mostrada en la Figura 23, dando a entender que los paquetes vienen con un formato incorrecto, según lo especificado en [83] reportado en el Apéndice A (Mensajes de Wireshark), es debido a que el disector de protocolo no puede fraccionar más el contenido del paquete, una de las razones dadas es porque una parte del mismo no es como se esperaba (no sigue las especificaciones del protocolo),

923	13.497739717	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
924	13.497742447	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
925	13.497744817	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
926	13.497747607	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
927	13.497749927	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
928	13.497752507	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
929	13.497755237	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
930	13.497757867	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
931	13.497760547	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
932	13.497763737	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
933	13.497766017	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
934	13.497766957	192.168.2.2	10.0.3.2	UDP	1300	6976 → 37380 Len=1258
935	13.497768458	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
936	13.497771418	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
937	13.497773728	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
938	13.497774208	192.168.2.2	10.0.3.2	UDP	487	6976 → 37380 Len=445
939	13.497776088	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
940	13.497778328	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
941	13.497780888	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
942	13.497783248	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
943	13.497785758	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
944	13.497804368	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
945	13.497806899	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]
946	13.497808939	192.168.2.2	10.0.3.2	RDT	1414	[Malformed Packet]

Figura 23: Error en Wireshark bitrate de 15000 kbps

Según en [84], la calidad del servicio de transmisión en vivo de acuerdo al estándar de Cisco debe cumplir con un valor de fluctuación inferior a 30 ms y una pérdida de paquetes inferior al 5 %, por lo que se tomó como objeto de prueba las transmisiones de videos de 3000 Kbps debido a que tienen unas pérdidas de aproximadamente 1.5 %, las transmisiones con 5000 Kbps se encuentran al límite de esta recomendación y las transmisiones de 9000 Kbps sobrepasan estos límites, por lo cual fueron descartados.

Teniendo en cuenta las gráficas y las imágenes observadas, se pudo concluir que independientemente del ancho de banda, la frecuencia usada o el índice de numerología; el bitrate más adecuado para realizar este tipo de transmisiones en este escenario con las herramientas utilizadas es con un bitrate de 3000 Kbps, ya que las pérdidas encontradas fueron bajas y la calidad de vídeo no presentó distorsiones en la imagen, siendo este el punto umbral del escenario.

4.2.1 Medición de la Calidad de la Experiencia–QoE Subjetiva

La estimación de la QoE de forma subjetiva, es el enfoque más preciso usado a lo largo de los años para evaluar la calidad percibida por un usuario, ya que no existe mejor indicador que el proporcionado por el propio ser humano [61].

Para la evaluación de la QoE subjetiva se tuvo en cuenta la recomendación ITU-T P.913 desarrollada para aplicaciones multimedia y la cual define metodologías para el desarrollo de experimentos subjetivos. ITU-T P.913 recomienda al menos 24 sujetos de prueba para validar un estudio con experimentos realizados en un ambiente controlado y un balance equilibrado de género y edad, además utilizar un muestreo a conveniencia, es decir, elegir un grupo social determinado para facilitar su accesibilidad, por ejemplo: estudiantes de universidad, empleados internos de una empresa, etc. [85].

El tipo de método de evaluación considerado fue el Índice por categorías absolutas (ACR) conocido también como método de evaluación de un solo estímulo, donde las secuencias de vídeo se presentan una a la vez y se califican de manera independiente como se evidencia en la Figura 24. Posee una escala de valoración absoluta de 5 niveles, con 5 representando la calidad más alta y ordenada decrecientemente de la siguiente manera: Excelente, Buena, Aceptable, Mediocre y Mala. Las calificaciones fueron registradas mediante encuestas en papel, donde los datos obtenidos fueron procesados e interpretados a través de una MOS, estandarizada por la ITU-T en su serie P.800.2. Las pruebas fueron desarrolladas en ambientes controlados, con condiciones cómodas y en silencio, evitando distracciones en el sujeto de prueba [85].

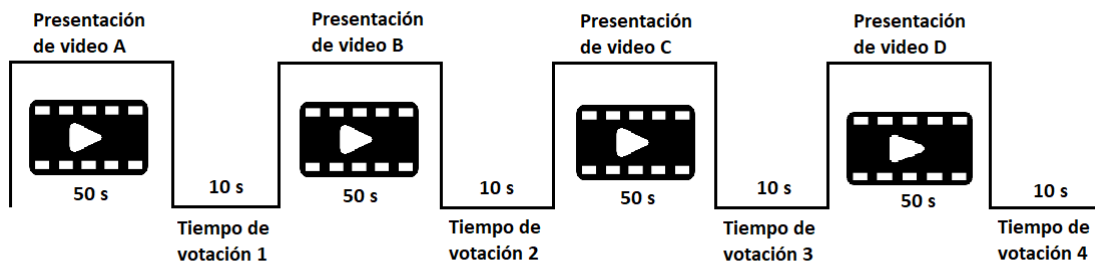


Figura 24: Diagrama de presentación de secuencias ITU-T P.913

El estudio fue de carácter voluntario, 30 personas aleatorias fueron partícipes de la prueba, 13 de ellos de género masculino y 17 de género femenino, con un rango de edad de 18 a 64 años. Un 30 % poseía conocimientos técnicos básicos y el 70 % eran totalmente inexpertos en el tema. Cada persona recibió un consentimiento informado, es decir, que cada sujeto recibió información de forma verbal y escrita de las condiciones de desarrollo de la prueba.

La carta de instrucciones y el cuestionario presentado a los sujetos de prueba se encuentra en el anexo E.

Capítulo 5

Determinación de las condiciones mínimas

5.1 Resultados QoE

Para el proceso de la determinación de las condiciones mínimas, primero se hicieron una serie de transmisiones con un tiempo de ejecución de 60 segundos, tomando diferentes valores de bitrates, 2800, 3200, 3600 y 4000 Kbps, ya que teniendo en cuenta los resultados de las pruebas realizadas en el capítulo 4, donde se evidenció que la mejor calidad obtenida es con bitrate de 3000 Kbps, se escogieron dichos rangos con el fin de determinar las condiciones mínimas aceptables. Por otro lado, con ayuda de Wireshark se obtuvieron los datos que se envían desde el servidor (relacionada a su Ethernet virtual, Veth0) y los que llegan en el cliente (relacionada a su Ethernet virtual, Veth2), para posterior análisis.

Segundo, se grabaron los videos que llegaron al cliente en VLC, nombrando cada video de la siguiente forma de acuerdo al valor del bitrate dado: Video A = 3600 Kbps, Video B = 2800 Kbps, Video C = 3200 Kbps y Video D = 4000 Kbps, y que fueron presentados a los usuarios que realizaron la respectiva evaluación de QoE. Puesto que el método escogido fue ACR, se definió el rango de calificaciones, en una escala numérica de cinco valores: 1 = malo, 2 = mediocre, 3 = aceptable, 4 = bueno y 5 = excelente, para poder brindar una mejor interpretación de las gráficas.

Y tercero, se sacaron las métricas de Packet Loss, Jitter, Interpacket delay y Throughput extraídas de cada secuencia de video con ayuda de Wireshark, para discutir la relación entre dichos valores con los resultados de la QoE obtenida en términos de MOS.

A continuación, se evidencia en la Tabla 16 los resultados obtenidos de la evaluación de QoE. La documentación de soporte de la realización de las encuestas, está de forma digital en el drive compartido llamado TrabajoInvestigación_JavierRosas_ValentinaMuñoz en la carpeta de Anexos de QoE.

Individuo	Video A	Video B	Video C	Video D
ID001	3	4	5	1
ID002	3	4	3	1
ID003	2	4	5	2
ID004	3	4	4	3
ID005	4	5	5	2
ID006	3	4	5	1
ID007	4	3	5	2
ID008	3	4	5	2
ID009	3	4	4	2
ID0010	4	5	5	1
ID0011	3	4	4	2
ID0012	3	5	4	1
ID0013	3	5	5	1
ID0014	2	4	3	1
ID0015	3	5	3	1
ID0016	3	5	3	1
ID0017	3	5	5	1
ID0018	4	5	4	1
ID0019	4	4	4	1
ID0020	4	5	4	1
ID0021	2	4	5	1

Individuo	Video A	Video B	Video C	Video D
ID0022	2	2	2	2
ID0023	3	5	5	1
ID0024	3	5	4	1
ID0025	3	4	4	2
ID0026	4	4	3	2
ID0027	3	5	3	1
ID0028	3	4	4	2
ID0029	3	4	4	1
ID0030	3	4	4	1

Tabla 16: Resultados cuestionarios de QoE

La Figura 25 presenta de forma gráfica los valores obtenidos en la prueba subjetiva para cada tipo de video de acuerdo al bitrate dado. Se muestran los valores promedios de QoE y las barras de error representan el intervalo de confianza del 95 %.

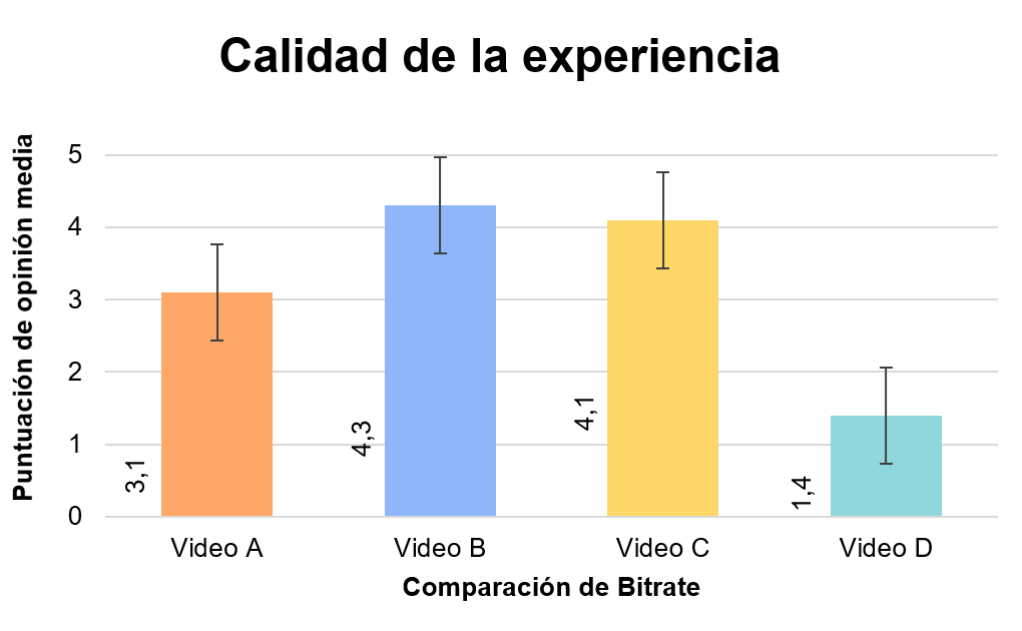


Figura 25: Evaluación de QoE para diferentes bitrates

De acuerdo a los resultados de la evaluación, se puede apreciar que el Video B y el Video C obtuvieron una mejor calificación evaluada como “Buena” frente al Video A y Video D, evaluada como “Aceptable” y “Malo”, respectivamente.

A continuación, se presentan los gráficos de Packet Loss, Inter Packet Delay, Jitter y Throughput.

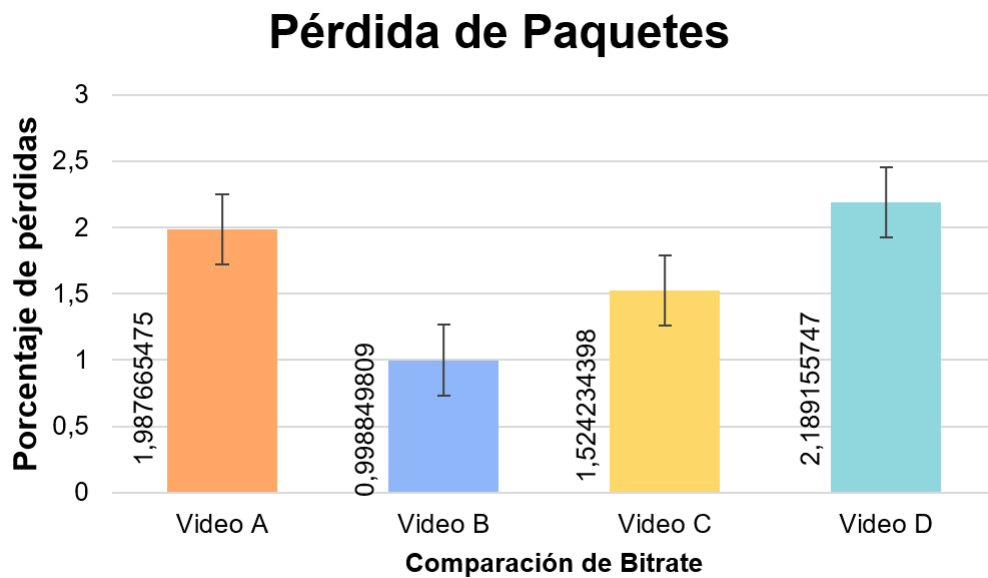


Figura 26: Gráfica de pérdida de paquetes

En la Figura 26, se puede observar que el Video B evaluado como “Buena” presenta una pérdida de paquetes menor equivalente al 1% en comparación con los videos A, C y D. También se evidencia que el Video C evaluado igual que el Video B como “Buena”, presenta una pérdida de paquetes por encima del 1%. El Video A evaluado como “Aceptable” presenta una pérdida de paquetes por encima del 1% y por debajo del 2%, lo que no es eficiente para una transmisión de video adecuada. Finalmente, el Video D evaluada como “Malo” presenta una pérdida de paquetes mayor en comparación con los videos A, B y C.

Throughput

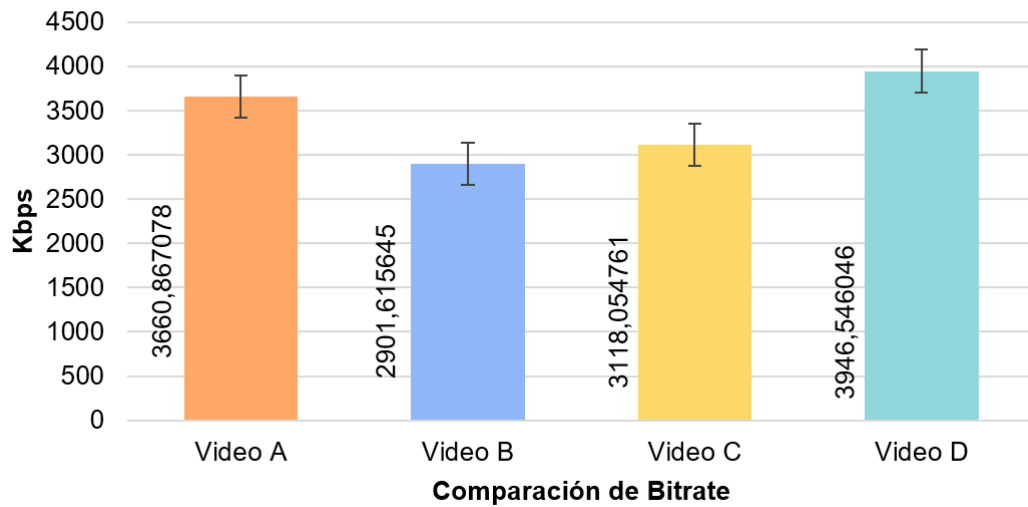


Figura 27: Gráfica de Throughput

En la Figura 27 se puede apreciar que el Video A y el Video B presentan un Throughput efectivo, ya que el rendimiento está por encima del bitrate dado (3600 kbps y 2800 kbps respectivamente), mientras que los Videos C y D presentan un Throughput limitado, ya que su rendimiento está por debajo del bitrate dado (3200 kbps y 4000 kbps respectivamente).

Retraso entre paquetes

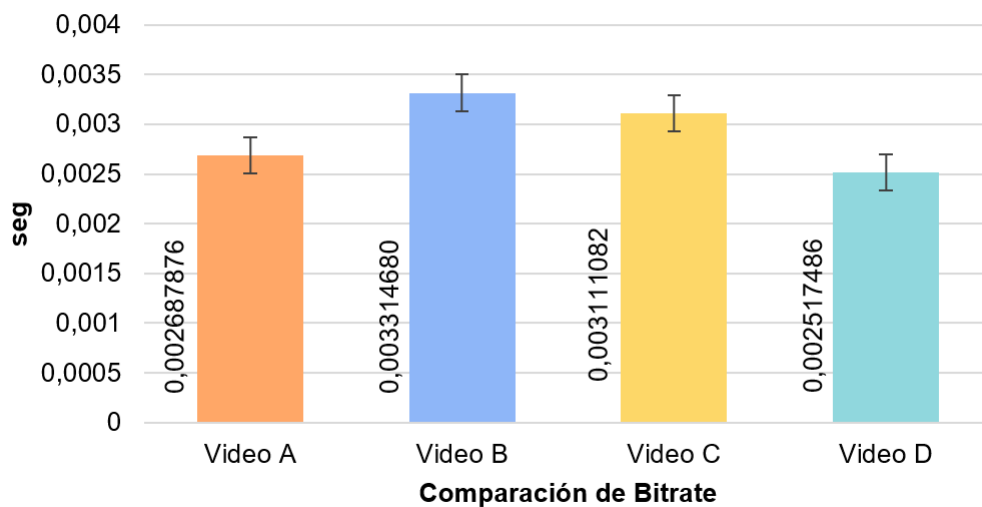


Figura 28: Gráfica de Retraso entre paquetes

En la Figura 28, el Video D presenta un menor retraso entre paquetes en comparación a los Videos A, B y C. El siguiente video con menor retraso entre paquetes es el Video A con un retraso promedio de 0,0026 seg, seguido del Video C que presenta un retraso entre paquetes con un promedio de 0,0031 seg. Y el Video que presenta el mayor retraso entre paquetes es el Video B con un promedio de 0,0033 seg.

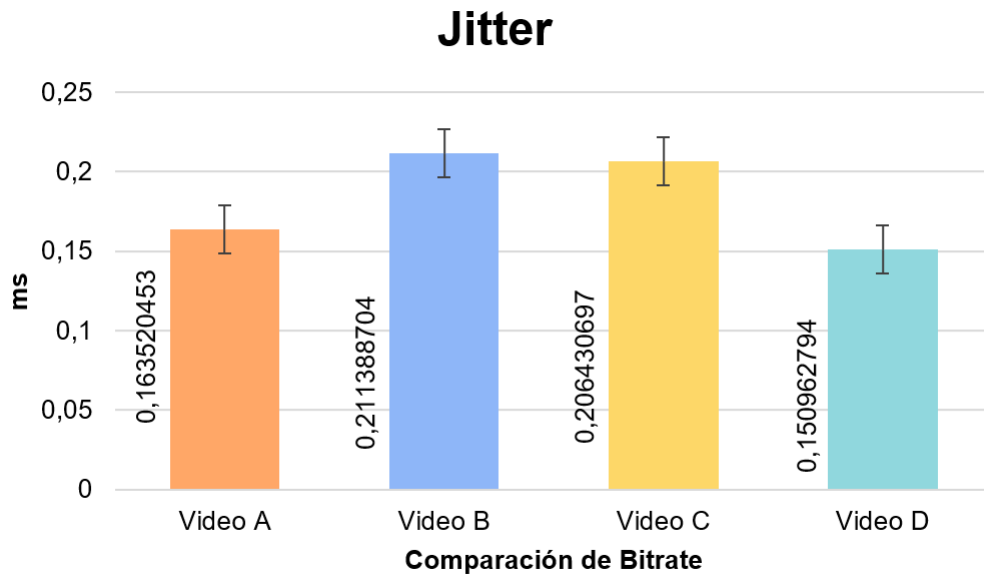


Figura 29: Gráfica de Jitter

En la Figura 29, se puede apreciar que el Video D presenta una menor fluctuación del retardo de 0,15 ms en comparación a los Videos A, B y C. El siguiente Video con menor fluctuación es el Video A con un promedio de 0,163 ms, seguido del Video C que presenta una fluctuación del 0,206 ms. Y el que mayor presenta fluctuación es el Video B con un promedio de 0,211 ms.

5.2 Interpretación y análisis de los resultados

En esta sección se presentan las interpretaciones y análisis de los datos obtenidos en la sección 5.1, así como la determinación final de los puntos umbrales para este escenario expuesto.

- Para este escenario en específico y de acuerdo a los resultados obtenidos con respecto a la QoE, los videos con mejor puntuación en términos de MOS fueron: el video B correspondiente a 2800 Kbps, y el video C correspondiente a 3200 Kbps, ya que la visualización de los mismos fue calificada como “Buena” por los sujetos de prueba, en comparación a los demás videos. Pero el video B presenta pérdidas menores con respecto al video C, por lo que, se deduce que esto es debido a que las pérdidas fueron producidas al momento de iniciar la transmisión, una vez se visualiza la transmisión en el destino las pérdidas se estabilizaron.
- Los datos obtenidos de la pérdida de paquetes de acuerdo a los resultados de la QoS indican que son relativamente bajas, puesto que inclusive con el valor más alto obtenido de 2,189 % según la Figura 26, sigue estando dentro de la categoría adecuada para el servicio de transmisión de video en vivo, cuyo valor debe ser inferior al 5 % [84]. Por lo tanto, para este escenario en específico, y de acuerdo a los rangos escogidos, no hubo demasiadas pérdidas de paquetes.
- De acuerdo a la fluctuación del retardo relacionada a la Figura 29, se puede apreciar que los datos obtenidos están correlacionados con el bitrate y el retraso entre paquetes, es decir, que a mayor bitrate, menor será el retraso entre paquetes y menor será la fluctuación del retardo y a menor bitrate, mayor será el retraso entre paquetes y mayor será la fluctuación. Sin embargo, todos los resultados del jitter siguen estando por debajo de 30 ms, que es el valor estándar para que las transmisiones de video en vivo funcionen de manera eficiente [84], indicando que la calidad del servicio de transmisión en vivo de este escenario sigue cumpliendo con las especificaciones del estándar.
- Para este escenario, se pudo apreciar que independiente como se encuentre el Throughput en cada uno de los videos, no afecta el rendimiento como si lo hace las

pérdidas de paquetes, para este caso el Throughput va muy ligado con el bitrate de la transmisión, es decir, según la Figura 27, los resultados obtenidos se encuentran por encima del valor del bitrate o por debajo, por ejemplo, para el video B que presenta un bitrate de 2800 Kbps, el valor del Throughput obtenido se encuentra en 2901,6 Kbps. Según en [84], el rendimiento es el tamaño de los datos recibidos por el receptor del cliente en comparación con los datos enviados. Cuanto mayor sea el rendimiento, mejor será el sistema.

- Teniendo en cuenta lo observado en el capítulo 4 y los resultados de la evaluación QoE, se puede analizar que no es posible visualizar el contenido de una transmisión de video con un bitrate alto (mayor a 9000 Kbps), ver figuras 16 y 17 donde las pérdidas son aproximadamente de 15 %, mientras que un video con un bitrate bajo (aproximadamente 3000 Kbps) si es posible reproducir su contenido, puesto que las pérdidas son menores, aproximadamente de 1.5 %, ver figuras 12 y 13. Según la Figura 25 referente a la MOS, estos videos son los que tienen mejor aceptación en los usuarios.
- Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, las condiciones mínimas más significativas para este escenario es una transmisión con un bitrate entre 2800 Kbps y 3200 Kbps, indiferentemente de la frecuencia, índice de numerología y ancho de banda. Según las figuras de la 12 a la 17, se puede observar que variando estos parámetros no se presentan cambios significativos, por lo que se asume que los parámetros de la red 5G son suficientes para este tipo de tráfico.

Capítulo 6

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se expone un escenario hipotético de Tele-cirugía donde se hizo una transmisión de videos de 360 grados a través de una red 5G, simulada mediante la librería Simu5G de Omnet++ y Wowza como servidor de video, configurando diferentes parámetros para encontrar las condiciones mínimas aceptables. De esta manera, el siguiente capítulo presenta las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del presente trabajo de investigación, las recomendaciones de los autores, así como el planteamiento de algunos posibles trabajos de investigación que pueden realizarse a partir de los resultados obtenidos aquí.

- El punto umbral de este escenario con las herramientas utilizadas es con un bitrate de 3000 Kbps.
- Las condiciones mínimas aceptables para este escenario de acuerdo a la prueba QoE con las herramientas utilizadas es un bitrate entre 2800 Kbps y 3200 Kbps.
- Las pérdidas de paquetes obtenidas de la QoS reflejaron una similitud con los resultados obtenidos de la prueba QoE.
- Variar el ancho de banda no evidenció cambios significativos en el video recibidos, debido a que el bitrate bajo con el que se pudo trabajar por limitaciones de las herramientas utilizadas no necesitó un gran ancho de banda. Para encontrar dife-

rencias en el video resultante, se necesitaría un ancho de banda en aproximadamente 2 Mhz, el cual es fácilmente alcanzable con redes 4G.

- Variar la frecuencia no evidenció cambios significativos en el video recibido con las herramientas utilizadas, ya que indiferentemente del rango de frecuencias que se escogiera para FR1 y FR2, la respuesta de la transmisión era similar, como se puede observar en las figuras 12 a la 17.
- Variar el índice de numerología en este escenario con las herramientas utilizadas, no evidenció cambios significativos en el video recibido, esto debido a que las pérdidas encontradas modificando este parámetro no presentaron grandes variaciones, como se puede observar en las figuras 12 a la 17.
- La variación del bitrate con las herramientas utilizadas, si brindó diferencias significativas en comparación a la frecuencia, ancho de banda e índice numerología.
- La simulación del escenario usando videos de 360° fue soportada con las herramientas expuestas a bitrates bajos, las pruebas a bitrates altos quedaron fuera del alcance del proyecto debido a las limitaciones de estas herramientas, sin embargo, se trabajaron con su máxima capacidad.

6.2 Recomendaciones

- Para la instalación de Simu5G en el sistema operativo Ubuntu 20.04 es necesario seguir la guía expuesta en este documento, debido a que si se sigue el tutorial de la página oficial, es posible que no funcione. En la guía que se encuentra en el Anexo B se especifica que para la instalación de Simu5G es necesario descargar los archivos de “Simu5G Plug and Play” encontrados en la página oficial, ya que el tutorial de instalación que ofrece Simu5G no permite la ejecución mediante ventana de comandos, por lo tanto, si se sigue esta recomendación se podrán ejecutar las carpetas referentes a la emulación de una red.
- Si se desea trabajar con OBS como herramienta de transmisión de videos de 360 grados en Linux, se debe tener en cuenta que OBS tiene limitaciones para estos

tipos de videos, por lo que se recomienda trabajar con videos monoscópicos, ya que se visualizan como representaciones planas de las imágenes de 360 grados [37].

6.3 Trabajos futuros

El trabajo realizado en esta investigación puede servir de punto de partida o de referencia para iniciar nuevas investigaciones. A continuación, se presentan algunas ideas en esta línea de trabajo.

- En este trabajo de investigación, se realizó una simulación usando Ubuntu 20.04, Wowza y Simu5G, la transmisión del servicio LVS se hizo usando el protocolo RTSP, puesto que RTSP usa UDP para el control de la sesión de medios de transmisión, sin embargo durante las pruebas realizadas se detectó que a bitrates muy altos el protocolo RTMP presenta un mejor resultado que RTSP, pero no fue posible pasar este tipo de tráfico por la red 5G simulada de Simu5G debido a problemas de compatibilidad. Es probable que con otros servidores de video si se permita este tipo de tráfico.
- En este trabajo de investigación se utilizó OBS Studio para la transmisión de video en el sistema operativo Ubuntu 20.04, sin embargo por sus limitaciones, se trabajó con videos 360 grados monoscópicos ya que se visualizan como representaciones planas de las imágenes de 360 grados. Es posible encontrar una herramienta que pueda reemplazar el programa OBS y que sea compatible con una transmisión de videos en 360 grados para Linux.
- Para determinar la calidad de la experiencia en este trabajo de investigación se hicieron pruebas subjetivas mediante encuestas para calificar la calidad de video observado, sin embargo, es necesario desarrollar una herramienta que calcule la QoE objetiva para tener en cuenta las características de los videos de 360 grados, donde se analicen parámetros como: calidad perceptiva, presencia, aceptabilidad y mareo cibernético, debido a que realizar una MOS es muy lenta y costosa.
- En esta investigación se trabajó con simuladores de NS3 y Simu5G, donde de NS3 no se encontró información que permitiera la emulación de una red 5G, y de Simu5G si

se encontró información, pero en la práctica tiene algunas limitaciones. Por lo tanto, es necesario seleccionar un emulador de red 5G que permita transmitir información entre varios dispositivos antes de llegar al UE, y que permita realizar transmisiones de videos con bitrates altos, generando así un escenario más confiable y permitiendo analizar videos de 360 grados.

- Realizar pruebas adicionales donde se exija el nivel máximo de capacidad de la red 5G simulada enviando videos de 360 grados, para en esas condiciones analizar si la variación de frecuencia e índice de numerología afecta el rendimiento de la red, teniendo en cuenta el Throughput, Jitter, Retraso entre paquetes y Pérdida de paquetes.

Bibliografía

- [1] Q. Zhang, J. Liu, and G. Zhao, “Towards 5g enabled tactile robotic telesurgery,” *ArXiv*, mar 2018.
- [2] J. J. Rassweiler, R. Autorino, J. Klein, A. Mottrie, A. S. Goetzen, J.-U. Stolzenburg, K. H. Rha, M. Schurr, J. Kaouk, V. Patel, *et al.*, “Future of robotic surgery in urology,” *BJU international*, vol. 120, no. 6, pp. 822–841, 2017.
- [3] C. Li, W. Zhang, Y. Liu, and Y. Wang, “Very long term field of view prediction for 360-degree video streaming,” *2019 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR)*, pp. 297–302, 2019.
- [4] H. Alemzadeh, R. Iyer, Z. Kalbarczyk, N. Leveson, and J. Raman, “Adverse events in robotic surgery: A retrospective study of 14 years of fda data,” *PloS one*, vol. 11, 07 2015.
- [5] R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi, and N. Kumar, “Tactile-internet-based telesurgery system for healthcare 4.0: An architecture, research challenges, and future directions,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 6, pp. 22–29, 2019.
- [6] L. Zhang, S. O. Amin, and C. Westphal, “Vr video conferencing over named data networks,” in *Proceedings of the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network, VR/AR Network '17*, (New York, NY, USA), p. 7–12, Association for Computing Machinery, 2017.
- [7] C. Ramírez and R. Reinell, *Servicio streaming de video con codificación H. 265*. PhD thesis, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería , 2019.
- [8] S. Kesavan, s. k. Eswaran, A. Kumar, and K. Vengatesan, “An investigation on adaptive http media streaming quality-of-experience (qoe) and agility using cloud media services,” *International Journal of Computers and Applications*, pp. 1–14, 02 2019.

- [9] W. Tu and W. Jia, “Adaptive playback buffer for wireless streaming media,” in *Proceedings. 2004 12th IEEE International Conference on Networks (ICON 2004) (IEEE Cat. No.04EX955)*, vol. 1, pp. 191 – 195 vol.1, 12 2004.
- [10] T.-Y. Huang, R. Johari, N. McKeown, M. Trunnell, and M. Watson, “A buffer-based approach to rate adaptation: Evidence from a large video streaming service,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 08 2014.
- [11] W. E. Shabrina, D. Wisaksono Sudiharto, E. Ariyanto, and M. A. Makky, “The qos improvement using cdn for live video streaming with hls,” in *2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA)*, pp. 1–5, 2020.
- [12] Y. Bandung, Sean, L. B. Subekti, I. G. B. B. Nugraha, and K. Mutijarsa, “Design and implementation of video on demand system based on mpeg dash,” in *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, pp. 318–322, 2020.
- [13] X. Liu, B. Han, F. Qian, and M. Varvello, “Lime: Understanding commercial 360° live video streaming services,” in *Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys ’19*, (New York, NY, USA), p. 154–164, Association for Computing Machinery, 2019.
- [14] S. Han, Y. Go, H. Noh, and H. Song, “Cooperative server-client http adaptive streaming system for live video streaming,” in *2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 176–180, 2019.
- [15] A. Ghosh, A. Mäder, M. Baker, and D. Chandramouli, “5g evolution: A view on 5g cellular technology beyond 3gpp release 15,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 09 2019.
- [16] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, and A. Aghvami, “Network slicing based 5g and future mobile networks: Mobility, resource management, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, 01 2017.
- [17] L. L. Puerto Suárez *et al.*, “Estudio de prospectiva en el uso de la tecnología 5g en colombia al 2025,” *Universidad Santo Tomás*, 2017.
- [18] G. Nardini, D. Sabella, G. Stea, P. Thakkar, and A. Virdis, “Simu5g—an omnet++ library for end-to-end performance evaluation of 5g networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181176–181191, 2020.

- [19] S. Li, L. Xu, and S. Zhao, “5g internet of things: A survey,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 10, 02 2018.
- [20] M. Ayad, S. Medjedoub, B. Mourad, K. Saoudi, and A. Arabi, “Evaluation of 4g / lte mobile network performances based on experimental data,” in *2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH)*, pp. 137–141, 2021.
- [21] R. Deiny Mardian, M. Suryanegara, and K. Ramli, “Measuring quality of service (qos) and quality of experience (qoe) on 5g technology: A review,” in *2nd IEEE International Conference on Innovative Research and Development, ICIRD 2019*, 2nd IEEE International Conference on Innovative Research and Development, ICIRD 2019, (United States), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., June 2019. 2nd IEEE International Conference on Innovative Research and Development, ICIRD 2019 ; Conference date: 28-06-2019 Through 30-06-2019.
- [22] U. Ali, G. Caso, L. De Nardis, K. Kousias, M. Rajiullah, O. Alay, M. Neri, A. Brunstrom, and M.-G. Di Benedetto, “Large-scale dataset for the analysis of outdoor-to-indoor propagation for 5g mid-band operational networks,” *Data*, vol. 7, no. 3, 2022.
- [23] R. McLaughlin, “5g low latency requirements.” <http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm>. Broadband library.
- [24] F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller, and F. Schneider, “Nfv and sdn—key technology enablers for 5g networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2478, 2017.
- [25] M. Clark, “Itu news 02-es abrir sendas hacia 5g,” in *Abrir sendas hacia 5G*, ITU NEWS Magazine, 2017.
- [26] R. Ali, Y. B. Zikria, A. K. Bashir, S. Garg, and H. S. Kim, “Urrlc for 5g and beyond: Requirements, enabling incumbent technologies and network intelligence,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67064–67095, 2021.
- [27] R. Daami and J. Pérez-Romero, “An efficient ran slicing strategy for a heterogeneous network with embb and v2x services,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 03 2019.

- [28] A. Anand, G. de Veciana, and S. Shakkottai, “Joint scheduling of urllc and embb traffic in 5g wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 2, pp. 477–490, 2020.
- [29] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi, “5g wireless network slicing for embb, urllc, and mmhc: A communication-theoretic view,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765–55779, 2018.
- [30] M. Erel-Ozcevik and B. Canberk, “Road to 5g reduced-latency: A software defined handover model for embb services,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, pp. 1–1, 06 2019.
- [31] W. E. Chen, X. Y. Fan, and L. X. Chen, “A cnn-based packet classification of embb, mmhc and urllc applications for 5g,” in *2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA)*, pp. 140–145, 2019.
- [32] C. Bockelmann, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, D. Gregoratti, G. Vivier, E. De Carvalho, Y. Ji, C. Stefanovic, P. Popovski, Q. Wang, M. Schellmann, E. Kosmatos, P. Demestichas, M. Raceala-Motoc, P. Jung, S. Stanczak, and A. Dekorsy, “Towards massive connectivity support for scalable mmhc communications in 5g networks,” *IEEE Access*, 2018.
- [33] T. Höbller, M. Simsek, and G. Fettweis, “Mission reliability for urllc in wireless networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. PP, pp. 1–1, 09 2018.
- [34] M. Iwabuchi, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, G. Ren, C. Tang, T. Tian, L. Gu, T. Takada, and T. Kashima, “5g field experimental trials on urllc using new frame structure,” in *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2017.
- [35] T. Höbller, M. Simsek, and G. P. Fettweis, “Joint analysis of channel availability and time-based reliability metrics for wireless urllc,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 206–212, 2018.
- [36] J. Kopf, “360° video stabilization,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 35, Nov. 2016.
- [37] K. K. Ra and J. J. Clark, “Decoupled hybrid 360° panoramic stereo video,” in *2019 International Conference on 3D Vision (3DV)*, pp. 386–394, 2019.
- [38] S. Afzal, J. Chen, and K. K. Ramakrishnan, “Characterization of 360-degree videos,” in *Proceedings of the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network, VR/AR Network '17*, (New York, NY, USA), p. 1–6, Association for Computing Machinery, 2017.

- [39] G. A. Cortes, “¿qué es el ancho de banda, cómo se calcula, qué parámetros necesito?.” <http://www.rnds.com.ar/articulos/065/108w.pdf>, 2020. Accedido 01-03-2021.
- [40] A. Laghari, H. He, and M. Channa, “Measuring effect of packet reordering on quality of experience (qoe) in video streaming,” *3D Research*, vol. 9, pp. 1–11, 09 2018.
- [41] J. Li, R. Feng, Z. Liu, W. Sun, and Q. Li, “Modeling qoe of virtual reality video transmission over wireless networks,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, 2018.
- [42] 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.
- [43] F. Andriyanto and M. Suryanegara, “The qoe assessment model for 5g mobile technology,” in *International Conference on Broadband Communication*, pp. 1–5, 11 2017.
- [44] F. S. Mohammadi and A. Kwasinski, “Qoe-driven integrated heterogeneous traffic resource allocation based on cooperative learning for 5g cognitive radio networks,” in *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, pp. 244–249, IEEE, 2018.
- [45] A. V. Sánchez Barón, C. Z. Gonzalez Godoy, *et al.*, “Diseño y simulación de red de comunicación en la mina de carbón santa maría en el municipio de sogamoso, boyacá,” *Universidad Santo Tomás*, 2017.
- [46] M. Calle, J. Tovar, Y. Castaño-Pino, and J. Cuellar, “Comparación de parámetros para una selección apropiada de herramientas de simulación de redes,” *Información tecnológica*, vol. 29, pp. 253–266, 12 2018.
- [47] P. Stotko, S. Krumpfen, M. B. Hullin, M. Weinmann, and R. Klein, “Slamcast: Large-scale, real-time 3d reconstruction and streaming for immersive multi-client live telepresence,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 25, p. 2102–2112, May 2019.
- [48] T. Teo, G. A. Lee, M. Billingham, and M. Adcock, “Investigating the use of different visual cues to improve social presence within a 360 mixed reality remote collaboration*,” in *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '19*, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2019.

- [49] T. Aykut, C. Zou, J. Xu, D. Van Opdenbosch, and E. Steinbach, “A delay compensation approach for pan-tilt-unit-based stereoscopic 360 degree telepresence systems using head motion prediction,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3323–3330, 2018.
- [50] R. Wirz, L. G. Torres, P. J. Swaney, H. B. Gilbert, R. Alterovitz, R. J. Webster, K. D. Weaver, and P. T. Russell, “An experimental feasibility study on robotic endonasal telesurgery,” *Neurosurgery*, vol. 76 4, pp. 479–84; discussion 484, 2015.
- [51] M. Salmimaa, J. Kimmel, T. Jokela, P. Eskolin, T. Järvenpää, P. Piippo, K. Müller, and J. Satopää, “Live delivery of neurosurgical operating theater experience in virtual reality: Delivery of operating theater experience in vr,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 26, 03 2018.
- [52] H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi, “Prototyping a digital twin for real time remote control over mobile networks: Application of remote surgery,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 02 2019.
- [53] S. Avgousti, A. S. Panayides, E. G. Christoforou, A. Argyrou, A. Jossif, P. Masouras, C. Novales, and P. Vieyres, “Medical telerobotics and the remote ultrasonography paradigm over 4g wireless networks,” in *2018 IEEE 20th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*, pp. 1–6, 2018.
- [54] L. Xie, Z. Xu, Y. Ban, X. Zhang, and Z. Guo, “360probdash: Improving qoe of 360 video streaming using tile-based http adaptive streaming,” in *Proceedings of the 25th ACM International Conference on Multimedia, MM '17*, (New York, NY, USA), p. 315–323, Association for Computing Machinery, 2017.
- [55] J. Li, R. Feng, Z. Liu, W. Sun, and Q. Li, “Modeling qoe of virtual reality video transmission over wireless networks,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, 2018.
- [56] H. T. T. Tran, N. P. Ngoc, C. T. Pham, Y. J. Jung, and T. C. Thang, “A subjective study on qoe of 360 video for vr communication,” in *2017 IEEE 19th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, pp. 1–6, 2017.
- [57] R. G. Azevedo, N. Birkbeck, I. Janatra, B. Adsumilli, and P. Frossard, “Subjective and viewport-based objective quality assessment of 360-degree videos,” in *2020*, 01 2020.

- [58] H. T. T. Tran, N. P. Ngoc, C. M. Bui, M. H. Pham, and T. C. Thang, “An evaluation of quality metrics for 360 videos,” in *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 7–11, 2017.
- [59] H. F. B. Orozco, J. L. Herrera, and E. A. Hoyos, “Estado del arte de los métodos de evaluación de qoe y entornos de emulación para el servicio de video en redes lte,” *Universidad Católica de Pereira*, Diciembre 2016.
- [60] D. J. Méndez Zúñiga, “Diseño de una red de videoconferencia con recepción mixta unicast/multicast con fines académicos en la sala de cómputo de la fetd.,” *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*, 2018.
- [61] H. F. B. Orozco, *Modelado de tráfico para el servicio de streaming de video en vivo - LVS en redes móviles LTE con calidad de la experiencia*. PhD thesis, Universidad del Cauca, Diciembre 2019.
- [62] H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi, “Prototyping a digital twin for real time remote control over mobile networks: Application of remote surgery,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 02 2019.
- [63] T. Teo, G. A. Lee, M. Billingham, and M. Adcock, “Investigating the use of different visual cues to improve social presence within a 360 mixed reality remote collaboration*,” in *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, VRCAI '19*, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2019.
- [64] I. Framework, “What is inet framework?,” in <https://inet.omnetpp.org/Introduction>, 2018.
- [65] G. Nardini, G. Stea, and A. Viridis, “Scalable real-time emulation of 5g networks with simu5g,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 148504–148520, 2021.
- [66] D. Keremedchiev and L. Kirilov, “Multimedia classroom model for e-learning and content creation,” in *Multimedia classroom model for e-learning and content creation*, 12 2020.
- [67] W. O. Leiva and J. E. P. Calderón, “Elaboración de videos educativos utilizando obs studio: lectura guiada 2,” *researchgate.net*, 2020.
- [68] P. W. Richards, “The unofficial guide to open broadcaster software,” *The Unofficial Guide to OBS*, 2021.

- [69] A. Kaur and S. Singh, “A survey of streaming protocols for video transmission,” in *Proceedings of the International Conference on Data Science, Machine Learning and Artificial Intelligence*, pp. 186–191, 2021.
- [70] G. Nardini, G. Stea, A. Virdis, and D. Sabella, “Simu5g: a system-level simulator for 5g networks,” in *SIMULTECH 2020*, pp. 68–80, INSTICC, 2020.
- [71] P. Hernández, “¿qué es la tasa de bits de video y por qué es importante?,” in *Wondershare Filmora*, 2022.
- [72] Techopedia, “Bit rate,” in <https://www.techopedia.com/definition/2681/bit-rate-br>, 2018.
- [73] K. Spiteri, R. Urgaonkar, and R. K. Sitaraman, “Bola: Near-optimal bitrate adaptation for online videos,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 4, pp. 1698–1711, 2020.
- [74] A. Kalampogia and P. Koutsakis, “H.264 and h.265 video bandwidth prediction,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. PP, pp. 1–1, 06 2017.
- [75] S. Deshpande, “36.4: Subjective and objective visual quality evaluation of 4k video using avc and hevc compression,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 43, 06 2012.
- [76] 3GPP, “Technical specification group services and system aspects,” in *TR 21.915 V15.0.0 Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items*, 2019.
- [77] 3GPP, “User equipment (ue) radio transmission and reception; part 2: Range 2 standalone,” in *TS 38.101-2 V17.5.0*, 2022.
- [78] “Adaptive coding and modulation (acm).” <https://www.satcomresources.com/acm-adaptive-coding-and-modulation>.
- [79] Y. Wang, W. Liu, and L. Fang, “Adaptive modulation and coding technology in 5g system,” in *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pp. 159–164, 2020.
- [80] S. Salih, A. Al-Refai, M. Suliman, and A. Mohammed, “Implementation of adaptive modulation for broadband wireless access networks using cognitive radio approaches,” pp. 345–349, 08 2013.

- [81] N. Rahim, N. Nasaruddin, N. Shah, F. Halim, K. Samah, F. Saman, and S. Rum, “Aftermath of pandemic covid-19 on tourism industry: A review on virtual tourism platform,” in *AIP Conference Proceedings*, p. 020173, AIP Publishing LLC, 2021.
- [82] N. Patriciello, S. Lagen, L. Giupponi, and B. Bojovic, “5g new radio numerologies and their impact on the end-to-end latency,” in *2018 IEEE 23rd international workshop on computer aided modeling and design of communication links and networks (CAMAD)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [83] “Appendix a. wireshark messages.” https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/AppMessages.html.
- [84] A. Nurrohman and M. Abdurohman, “High performance streaming based on h264 and real time messaging protocol (rtmp),” in *2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, pp. 174–177, 2018.
- [85] F. D. Valle Medina, “Evaluación subjetiva de un sistema de streaming de vídeo basado en dash,” *Universitat Politècnica de València*, 2018.
- [86] A. Oloomi and H. Khanmirza, “Fault tolerance of rtmp protocol for live video streaming applications in hybrid software-defined networks,” *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*, vol. 7, no. 2, pp. 241–250, 2019.
- [87] L. Jianbing and C. Shuhui, “The design and implementation of rtsp/rtp multimedia traffic identification algorithm,” in *Journal of Physics: Conference Series*, p. 052033, IOP Publishing, 2019.

Anexos

Anexo A

Resumen de las experiencias vividas en el proyecto

Se inició haciendo una investigación y pruebas de funcionalidad de las herramientas expuestas resaltando que como primer enfoque era encontrar una herramienta que permitiera emular una red. Se empezó con NS3, NS3 mantiene y desarrolla activamente los modelos de simulación de código abierto de las principales tecnologías 4G y 5G 3GPP, LTE (Long Term Evolution) y NR (New Radio), también conocidas respectivamente como LENA y 5G-LENA. 5G-LENA es un módulo conectable a NS3 y es la evolución natural de LENA, se centró principalmente en la refactorización de las capas PHY y MAC de los códigos LTE para proporcionar una implementación compatible con el estándar de Release 15 NR [65]. Sin embargo, y de acuerdo a los resultados de la investigación y pruebas, no se encontró ningún estudio que demostrara que esta librería era apta para emulaciones, principalmente esta herramienta está enfocada a la parte de la simulación, por este motivo se decidió cambiar la herramienta.

Como segunda medida se analizó OMNET++, de acuerdo a la investigación se encontró una herramienta llamada Simu5G, que permite configurar escenarios de red arbitrariamente complejos, esto hace que Simu5G sea capaz de simular escenarios que incluyen toda la pila completa de protocolos de Internet para evaluar el rendimiento de las aplicaciones que exploran la conectividad 5G. Además de la simulación, la emulación en tiempo real con Simu5G es posible gracias a la combinación de varios factores, como las capacidades del entorno OMNeT++ para ejecutar un programador de eventos en tiempo real y la librería INET para intercambiar paquetes entre una simulación en ejecución y el sistema operativo [63]. INET es una librería popular diseñada para OMNeT++. Incluye una gran cantidad de modelos de elementos de redes informáticas, por ejemplo, hosts, protocolos, enrutadores/conmutadores, conexiones, etc. En particular, INET mo-

de los muchos protocolos de la suite TCP/IP, como TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP, etc., así como protocolos de capa 2 cableados e inalámbricos (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, etc) [18].

Para este proyecto se usaron un total de 5 computadores, los 2 primeros fueron equipos personales que cuentan ambos con un procesador Intel Core I5 de décima generación, 8 GB de RAM, y un sistema operativo Windows 10.

Para el montaje de la red 5G se utilizó el sistema operativo Ubuntu 20.04 LTS en uno de los computadores personales, en ese sistema operativo se trabajó con NS3 y con Simu5G decidiendo finalmente enfocar el trabajo con el segundo de ellos, la guía de instalación se encuentra en el siguiente enlace [Simu5G](#) en donde lo primero que se hizo fue instalar OMNeT++ siguiendo el paso a paso encontrado en el siguiente video [Install OMNET++ 5.5.1 and INET 4.2.1](#) aprovechando que también explica la instalación de Inet, se descargaron los archivos de la página oficial de Simu5G en lugar de los que se muestran en el video, cumpliendo así los prerrequisitos que se especifican en la guía de instalación.

Se continuó con la instalación de Simu5G, probando instalar esta librería de dos formas diferentes: importándola desde OMNeT++ y mediante la Terminal de Ubuntu; obteniendo en ambos casos el mismo resultado, en el que no era posible ejecutar la emulación. Por el lado del IDE de OMNeT++ se obtienen los siguientes resultados, al ejecutar la emulación siguiendo la guía de instalación encontrada en la página se genera el siguiente error.

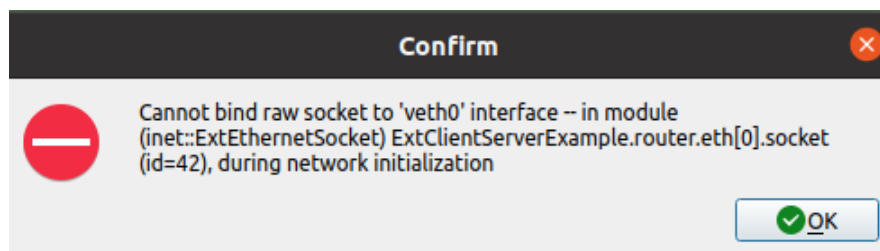


Figura A.1: Error IDE

El error de la ejecución mediante el IDE de OMNeT++ indica que hacía falta la creación de unas redes virtuales para su correcto funcionamiento, dichas redes eran creadas automáticamente al ejecutar la emulación por la terminal, así que se tomó la parte del código donde se creaban las redes virtuales y se ejecutó por aparte logrando así poder correr la emulación por el IDE.


```

1 #!/bin/bash
2 # make sure you run '. setenv' in the Simu5G root directory before running this script
3
4
5 # create virtual ethernet link: veth0 <--> veth1, veth2 <--> veth3
6 sudo ip link add veth0 type veth peer name veth1
7 sudo ip link add veth2 type veth peer name veth3
8
9 # veth0 <--> veth1 link uses 192.168.2.x addresses; veth2 <--> veth3 link uses 192.168.3.x addresses
10 sudo ip addr add 192.168.2.2 dev veth1
11 sudo ip addr add 192.168.3.2 dev veth3
12
13 # bring up both interfaces
14 sudo ip link set veth0 up
15 sudo ip link set veth1 up
16 sudo ip link set veth2 up
17 sudo ip link set veth3 up
18
19 # add routes for new link
20 sudo route add -net 192.168.2.0 netmask 255.255.255.0 dev veth1
21 sudo route add -net 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 dev veth3
22 sudo route add -net 10.0.2.0 netmask 255.255.255.0 dev veth3 # enables backward path to the simulation
23 sudo route add -net 10.0.3.0 netmask 255.255.255.0 dev veth1 # enables backward path to the simulation
24

```

Figura A.2: Creación de las redes virtuales



Figura A.3: Emulación corriendo mediante el IDE de OMNeT++

La entrega de la oficina y el computador con los cuales se iba a trabajar en el proyecto, la hicieron después de tener funcionando la transmisión mediante el IDE de OMNeT++ en el computador personal, dicho computador era indispensable para poder trabajar con el diseño de la emulación esperada, ver Figura 6, por lo cual se procedió con la instalación de Simu5G en el nuevo computador entregado, el computador de la oficina tenía las siguientes características: Procesador Intel Pentium y 2gb de RAM, lo que hizo muy lenta cada compilación necesaria para la instalación.

La página de Simu5G tiene varias guías además de la usada para la instalación, se trabajó con la guía que explica todo el proceso de una emulación de una red 5G en la que se podían transmitir paquetes de datos de un computador a otro, al intentar correr la emulación mediante el IDE se observó que la red era visible y funcional, pero no se podía mandar paquetes de un lado a otro, ni tampoco hacer ping a la red interna 5G.

Se llegó a la conclusión que al correr la emulación por el IDE, había dos tipos de configuraciones, por Virtual Ethernet y por la configuración Tun/Tap.

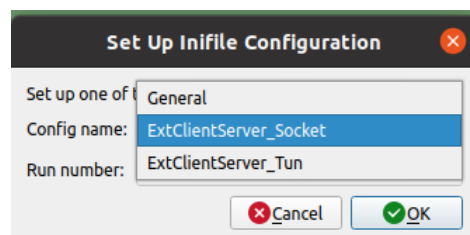


Figura A.4: Tipos de configuración por IDE

Se encontró otro archivo que mostraba cómo hacer la configuración, este se llama `run_wTun.sh`, se siguió este nuevo archivo configurando los bridges para poder hacer la conexión, y se llegó al mismo resultado que con las redes virtuales, donde se evidenciaba que había una red funcional, pero no se podía interactuar con ella.

Se pidió asesoría a diferentes Ingenieros de la Universidad del Cauca, así como de otras Universidades, sin embargo, las respuestas obtenidas no fueron positivas para el inconveniente encontrado, se escribió también en el foro oficial de Simu5G habilitado en la página, en busca de ayuda, también se envió un correo a todos los creadores del simulador, explicando lo que se había hecho y que era lo que no estaba funcionando, del foro no se obtuvo alguna respuesta, pero Giovanni Nardini, uno de los creadores del simulador, respondió el correo enviado, su mensaje fue el siguiente:

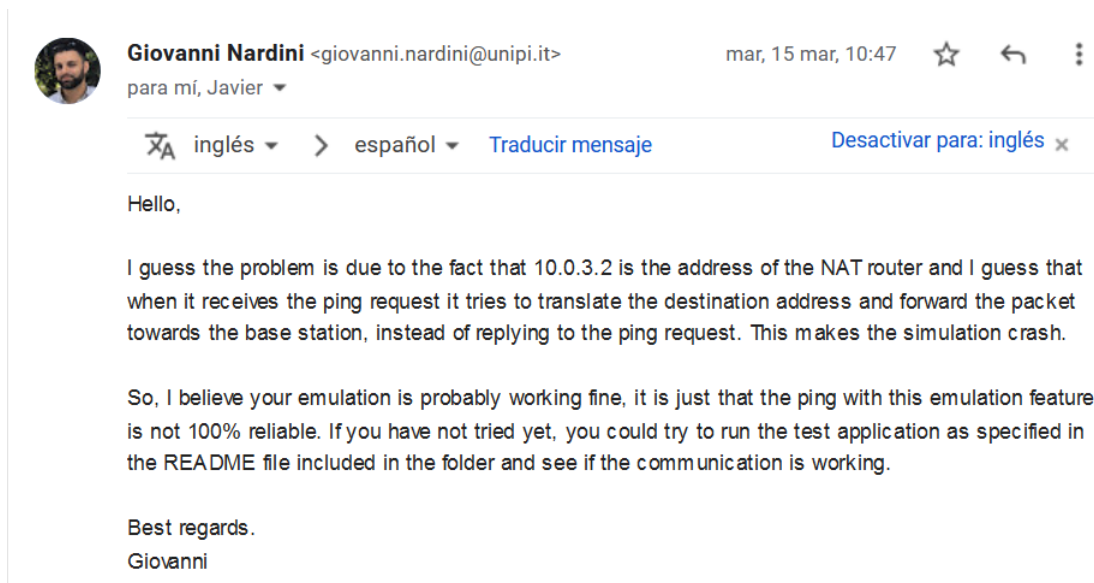


Figura A.5: Respuesta de Giovanni Nardini

Donde explica que el simulador no es totalmente funcional con el comando ping, y que por tal motivo no estaba haciendo nada, recomendó que para la emulación se siguiera los pasos del archivo README que se encuentra en cada una de las emulaciones que tienen por defecto. Siguiendo la guía de configuración encontrada en el archivo README de la emulación extClientServer, se observó que para que funcionara todo se debía ejecutar la emulación mediante la Terminal y no mediante el IDE, así que se ejecutó la emulación por la terminal, pero generó el siguiente error.

```
unicauca@unicauca: ~/simu5g-workspace/Simu5G-1.2.0/emulation/extclientserver
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/Simu5G-1.2.0/emulation/extclientserver$ ./run_wSocket.sh
Actual changes:
rx-checksumming: off
tx-checksumming: off
  tx-checksum-ip-generic: off
  tx-checksum-sctp: off
tcp-segmentation-offload: off
  tx-tcp-segmentation: off [requested on]
  tx-tcp-ecn-segmentation: off [requested on]
  tx-tcp-mangleid-segmentation: off [requested on]
  tx-tcp6-segmentation: off [requested on]
OMNeT++ Discrete Event Simulation (C) 1992-2021 Andras Varga, OpenSim Ltd.
Version: 6.0pre11, build: 210423-26668997ef, edition: Academic Public License -- NOT FOR COMMERCIAL USE
See the license for distribution terms and warranty disclaimer

Setting up Cmdenv...

Loading NED files from /home/unicauca/simu5g-workspace/Simu5G-1.2.0/simulations: 15
Loading NED files from /home/unicauca/simu5g-workspace/Simu5G-1.2.0/emulation: 7
Loading NED files from /home/unicauca/simu5g-workspace/Simu5G-1.2.0/src: 87
Loading NED files from /home/unicauca/simu5g-workspace/inet4.3/src: 1053

Preparing for running configuration ExtClientServer_Socket, run #0...
Assigned runID=ExtClientServer_Socket-0-20220614-19:44:53-68222
```

Figura A.6: Visualización del error ejecutado por la terminal

Se instalaron varias veces todos los paquetes de nuevo, intentando poder ejecutar la emulación mediante la terminal, para poder comenzar con el tráfico de la información, por lo que se llegó a la conclusión de que se estaba perdiendo mucho tiempo al trabajar con el computador de la oficina, debido a que cada vez que se tenía que reinstalar Simu5G era necesario compilar todas las librerías y dicho computador tardaba mucho tiempo en realizar esa actividad, se habló con el director el cual nos facilitó otro computador que tenía disponible, este computador tiene un procesador Intel Core I7 de cuarta generación y 4 gb de RAM, este cambio ayudó bastante a probar diferentes configuraciones y diferentes formas de instalar Simu5G.

Todas estas instalaciones fallaron, ya que no era posible ejecutar Simu5G por la terminal de Ubuntu, navegando en la página web oficial de Simu5G, se encontró un enlace que permite descargar una imagen de una máquina virtual (plug and play) la cual seguía trabajando con Ubuntu 20.04, se descargó en un computador personal el cual ya tenía instalado VirtualBox y se importó el proyecto, dentro de esa máquina virtual se ejecutó la emulación mediante la terminal y funcionaba correctamente.

Con base en esa máquina virtual, se intentó instalar Simu5G en el computador de la oficina, teniendo en cuenta como se creaban los directorios, y donde se almacenaban las librerías dentro del WorkSpace de OMNeT++, incluso así, la emulación seguía sin funcionar en el computador de la oficina que corría Ubuntu nativo.

Se intentó trabajar directamente con la máquina virtual, pero no era posible conectar otros computadores, y el sistema operativo se quedaba falto de potencia, así que finalmente se decidió enviar las carpetas de Simu5G y de Inet que se encontraban en la máquina virtual y probar la instalación de Simu5G con esas librerías y no las descargables desde la página web, siendo esta la única forma en la que se pudo correr la emulación mediante la terminal de Ubuntu y donde efectivamente se podía enviar paquetes de datos pasando por la red 5G.

Con la red funcional y de acuerdo a las guías de Simu5G, se dio paso al intento de configuración de una emulación con tres computadores, es decir, se tendrían 3 componentes: Host A, que actúa como cliente, Host B que emula la red 5G ejecutando una instancia de Simu5G y Host C, que actúa como servidor de aplicaciones de transmisión de video.

Sin embargo, se tuvo muchas complicaciones en el momento de las configuraciones, por ejemplo, se realizaron bien las comunicaciones con los tres computadores, pero al momento de pasar por la red de Simu5G, la comunicación fallaba, otra por el tipo del sistema operativo que tenía uno

de los computadores, ya que ciertos comandos establecidos no se podían ejecutar correctamente en Windows. Luego se decidió implementar otro escenario que se muestra en la guía de Simu5G, aplicando el cliente en el mismo Host donde se aloja la red, es decir, se tendrían dos componentes (dos computadores a utilizar), el Host A, que actuaría como cliente y solicita un servicio del servidor y que además emula la red 5G ejecutando una instancia de Simu5G, y el Host B, que actuaría como servidor de aplicaciones de transmisión de video. Sin embargo, las conexiones y las tablas de enrutamiento funcionaban correctamente comprobando las comunicaciones con el comando ping entre los computadores y con el comando iperf con la red, dicho comando se encuentra en la guía del archivo README. Investigando cómo trabajar con el comando iperf, se encontró una alternativa al ping, este se llama hping3 que a diferencia del ping convencional que envía paquetes ICMP, este permite el envío de paquetes TCP, UDP y RAW-IP, por lo que se podía llegar a validar las comunicaciones hasta el NatRouter interno de Simu5G, lo que con el ping normal no se podía validar, así que se decidió hacer todo el proceso como simulación en uno de los computadores personales, el cual era significativamente más potente que los dos computadores que fueron entregados para el trabajo.

Para el proceso de la configuración del servidor, se siguió la guía de emulación de Simu5G el cual trabajaba con OpenNess, pero no se logró completar su funcionamiento. Se habló nuevamente con Giovanni Nardini para averiguar si era posible usar otra herramienta como servidor, donde su respuesta fue la siguiente.



Figura A.7: Segunda respuesta de Giovanni Nardini

Por lo tanto, se decidió trabajar con Wowza y OBS para el servidor. Luego para el cliente se configuró VLC media player, se intentó hacer una primera transmisión de un video sencillo, el

cual podía usar dos protocolos diferentes, el protocolo de mensajería en tiempo real (Real Time Messaging Protocol, RTMP) y el protocolo de transmisión en tiempo real (Real Time Streaming Protocol, RTSP). RTMP es uno de los protocolos más utilizados para transmisión de video y aplicaciones VoD en Internet. Utiliza el protocolo TCP y emplea una combinación de métodos de almacenamiento en búfer y captura previa para implementar la tolerancia a fallas [86]. Por el contrario, el protocolo RTSP proporciona transmisión de video a través de UDP o TCP, puede controlar múltiples conexiones y proporcionar una forma de seleccionar el canal de transmisión. En otras palabras, el RTSP actúa como un control remoto de red para el servidor multimedia [87].

Con RTMP se tuvo problemas a la hora de recuperar el video, por lo que se cambió el protocolo a RTSP, el cual está mejor orientado a las necesidades del proyecto, como aceptar la codificación H.265 y un retraso mucho menor, con estos cambios ya se tenía la simulación funcionando correctamente. Acto seguido, se intentó enviar un video de 360 grados desde OBS, pero en el lado del cliente llegaba como un video plano, según una investigación realizada se descubrió que hasta la fecha no hay una herramienta que permita transmitir videos de 360 grados en Linux, por lo que se decidió trabajar con videos planos, ya que alcanza a saturar la red, debido a que el video de 360 grados sigue teniendo el mismo peso.

Se comparó el video que se envió con el video que se recibía directamente de Wowza y con el video que pasaba por la red, en donde se pudo observar que había una pérdida de calidad del video al llegar al servidor Wowza, si el video pasaba por la red 5G incluso con un bit/rate bajo la imagen se distorsionaba totalmente, además de que el computador perdía mucha potencia al hacer toda la simulación, se encontró que el codificador usado por OBS por defecto es H.264 y como se observa en el párrafo anterior, se necesita un codificador más potente como el H.265, se decidió entonces hacer uso del quinto y último computador usado en este proyecto, el cual tiene las siguientes características, procesador Ryzen 5600X, 16G de RAM y una tarjeta gráfica Nvidia RTX 3060, este computador posee un codificador NVENC perteneciente a las gráficas Nvidia, el cual se podía activar en OBS. Utilizando este codificador, la pérdida de calidad de video al llegar a Wowza era muy baja, y al pasar por la red la pérdida de paquetes era mínima con un bit/rate bajo, por lo tanto, se encontró que para este tipo de transmisiones hace falta un hardware bastante potente debido a que la transmisión es muy exigente, y al utilizar este computador no se perdía potencia, lo que permitía variar el bit/rate de la transmisión y probar diferentes parámetros de la red.

Anexo B

Configuración de Simu 5G

Para el proceso de instalación de Simu5G versión 1.2.0 son necesarios OMNeT++ v6.0 e INET v4.3.2, el archivo OMNeT++ se puede descargar de la siguiente pagina [Simu5G](#), Inet y Simu5G se pueden descargar de el siguiente enlace

https://drive.google.com/file/d/1tcnIp_Z9UaArMWPTsf_fZrh_t01dFHsk/view?usp=sharing

Una vez descargados los archivos, se debe descomprimir la carpeta que contiene OMNeT++ v6.0

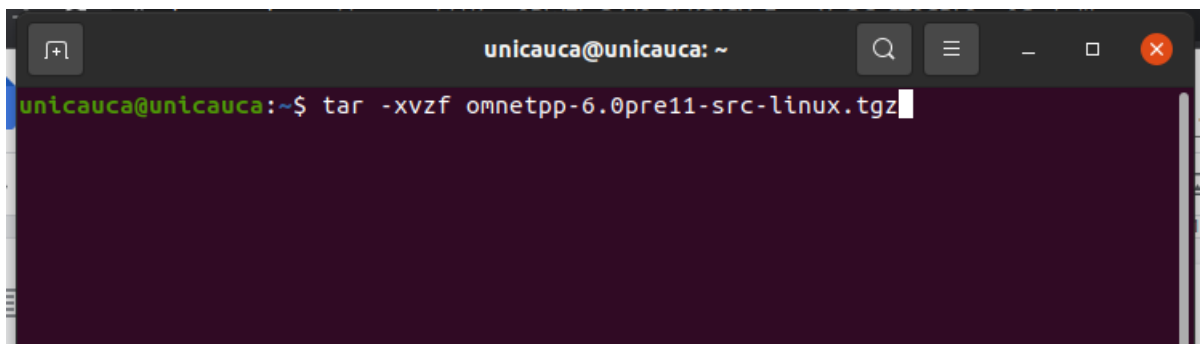


Figura B.1: Comando para descomprimir OMNeT++ v6.0

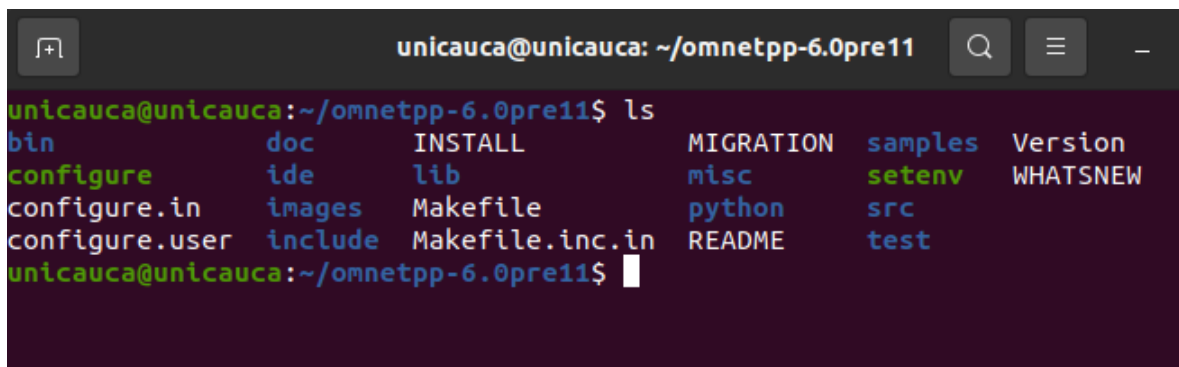
Acto seguido, se actualiza las librerías de Ubuntu con los comandos:

- sudo apt install -f
- sudo apt update
- sudo apt upgrade

Luego, se instala todos los paquetes necesarios para trabajar con Omnet de acuerdo a los siguientes comandos:

- `sudo apt-get install build-essential gcc g++ bison flex perl python python3 qt5-default libqt5opengl5-dev tcl-dev tk-dev libxml2-dev zlib1g-dev default-jre doxygen graphviz libwebkitgtk-1.0`
- `sudo apt-get install openscenegraph-plugin-osgearth libosgearth-dev`

Posteriormente, se abre una nueva terminal para configurar las variables de entorno del sistema, para ello se entra en la carpeta `omnetpp-6.0pre11`



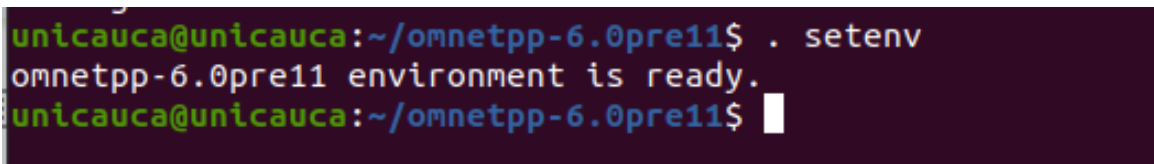
```
unicauca@unicauca: ~/omnetpp-6.0pre11
unicauca@unicauca:~/omnetpp-6.0pre11$ ls
bin          doc          INSTALL     MIGRATION  samples     Version
configure    ide          lib          misc        setenv      WHATSNEW
configure.in images       Makefile    python      src
configure.user include     Makefile.inc.in README      test
unicauca@unicauca:~/omnetpp-6.0pre11$
```

Figura B.2: Comando para listar el contenido del directorio `omnetpp-6.0pre11`

Se ejecuta el comando:

```
. setenv
```

El cual debe mostrar la siguiente salida como se evidencia en la Figura B.3



```
unicauca@unicauca:~/omnetpp-6.0pre11$ . setenv
omnetpp-6.0pre11 environment is ready.
unicauca@unicauca:~/omnetpp-6.0pre11$
```

Figura B.3: Comando para ejecutar el entorno `omnetpp-6.0pre11`

Se edita el archivo `bashrc` con el comando:


```
gedit ~/.bashrc
```

para agregar el siguiente path al final del archivo (tener en cuenta la ruta donde se haya instalado omnet).

```
export PATH=$PATH:/home/unicauca/omnetpp-6.0pre11/bin
```

```
111 if ! shopt -oq posix; then
112   if [ -f /usr/share/bash-completion/bash_completion ]; then
113     . /usr/share/bash-completion/bash_completion
114   elif [ -f /etc/bash_completion ]; then
115     . /etc/bash_completion
116   fi
117 fi
118 export PATH=$PATH:/home/unicauca/omnetpp-6.0pre11/bin
119
```

Figura B.4: Evidencia del path agregado

Luego se cierra la terminal para que los cambios tengan efecto, posteriormente se instala la librería de Python Pip3 con el comando:

```
sudo apt install python3-pip
```

Con pip3 se ejecuta el comando:

```
pip3 install numpy scipy pandas matplotlib posix_ipc
```

Al terminar la instalación, se ejecuta el comando:

```
./configure
```

dentro de la carpeta de Omnet y finalizado el proceso se debe visualizar el siguiente mensaje.

```
configure: WARNING: Optional package MPI (needed for parallel simulation) not found.
checking for PTHREAD with CFLAGS=" -fPIC " LIBS="-lpthread"... yes
checking for Akaroa with CFLAGS=" -fPIC -I/usr/local/akaroa/include" LIBS="-L/usr/loca
l/akaroa/lib -lakaroa -lfl"... no
configure: WARNING: Optional package Akaroa not found
configure: creating ./config.status
config.status: creating Makefile.inc
config.status: creating src/qtenv/qtenv.pri

WARNING: The configuration script could not detect the following packages:

    MPI (optional) Akaroa (optional)

Scroll up to see the warning messages (use shift+PgUp), and search config.log
for more details. While you can use OMNeT++ in the current configuration,
be aware that some functionality may be unavailable or incomplete.

Your PATH contains /home/tesis/Tesis/omnetpp-6.0pre11/bin. Good!
```

Figura B.5: Evidencia de configuración exitosa del path

Y por último, se ejecuta el comando “make” para dar inicio a la instalación de Omnetpp, terminado el proceso se debe el siguiente mensaje

```
Creating executable: out/gcc-debug//osg-satellites_dbg
==== Compiling wiredphy ====
RxAtEnd.cc
RxAtStart.cc
Sink.cc
Source.cc
Tx.cc
ProgressInfo_m.cc
Creating executable: out/gcc-debug//wiredphy_dbg

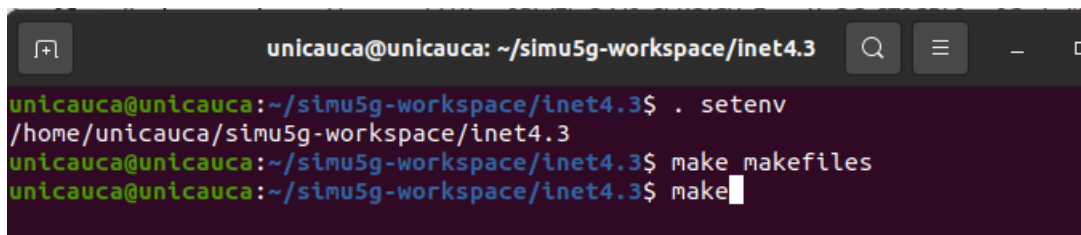
Now you can type "omnetpp" to start the IDE
```

Figura B.6: Evidencia de instalación exitosa de Omnetpp

Por otro lado, para la instalación de inet se debe descargar el archivo .zip que contiene la carpeta de Inet4.3 y la carpeta de Simu5G. Luego de descomprimir los archivos, se debe ingresar a la carpeta de inet y ejecutar los siguientes comandos:

- . setenv
- make makefiles
- make

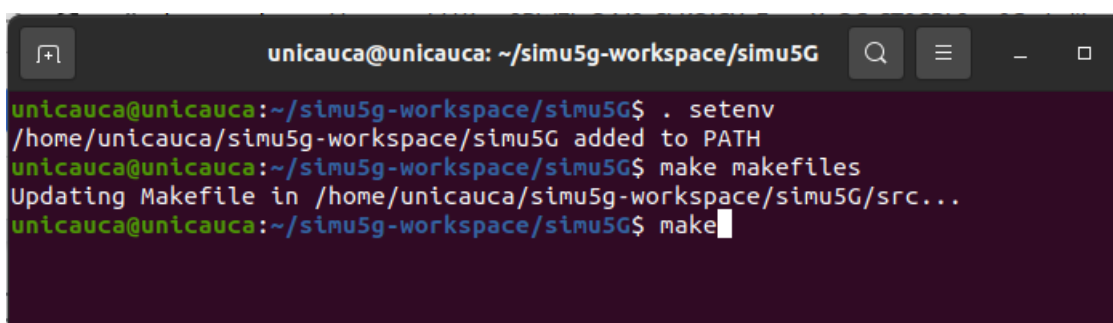
Como se evidencia en la Figura B.7



```
unicauca@unicauca: ~/simu5g-workspace/inet4.3
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/inet4.3$ . setenv
/home/unicauca/simu5g-workspace/inet4.3
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/inet4.3$ make makefiles
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/inet4.3$ make
```

Figura B.7: Comandos para la instalación de inet

Se repite los mismos comandos en la carpeta SIMU 5G



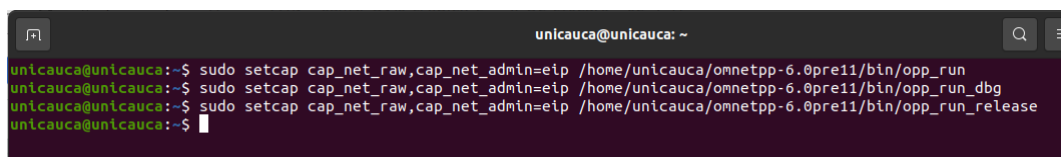
```
unicauca@unicauca: ~/simu5g-workspace/simu5G
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/simu5G$ . setenv
/home/unicauca/simu5g-workspace/simu5G added to PATH
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/simu5G$ make makefiles
Updating Makefile in /home/unicauca/simu5g-workspace/simu5G/src...
unicauca@unicauca:~/simu5g-workspace/simu5G$ make
```

Figura B.8: Comandos para la instalación de Simu5G

Para poder enviar/recibir paquetes a través de sockets, debemos configurar los permisos por medio de los siguientes comandos:

- `sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip path/to/opp_run`
- `sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip path/to/opp_run_dbg`
- `sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip path/to/opp_run_release`

Teniendo en cuenta que se debe buscar la ruta donde se encuentran los archivos opp_run, opp_run_dbg, opp_run_release, y cambiar la parte de “path/to” por la ruta correspondiente.



```
unicauca@unicauca: ~
unicauca@unicauca:~$ sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip /home/unicauca/omnetpp-6.0pre11/bin/opp_run
unicauca@unicauca:~$ sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip /home/unicauca/omnetpp-6.0pre11/bin/opp_run_dbg
unicauca@unicauca:~$ sudo setcap cap_net_raw,cap_net_admin=eip /home/unicauca/omnetpp-6.0pre11/bin/opp_run_release
unicauca@unicauca:~$
```

Figura B.9: Configuración para enviar/recibir paquetes

Con la configuración anterior, ya es posible ejecutar emulaciones por ventana de comandos (es necesario seguir el archivo Readme de cada emulación).

Por otra parte, si se necesita importar los proyectos al IDE de Omnet++, se deben seguir los siguientes pasos:

Primero, seleccionar la opción “File/Import”

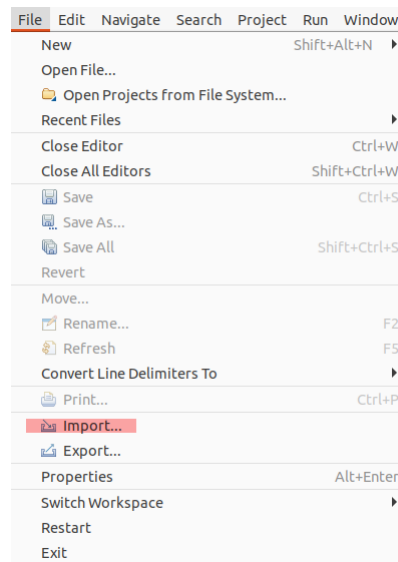


Figura B.10: Importar proyectos al IDE de Omnet

Segundo, seleccionar “General/Existing Projects into Workspace”

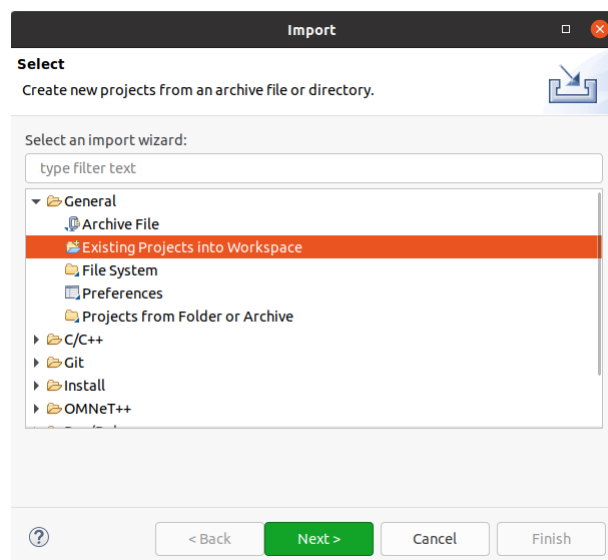


Figura B.11: Seleccionar Existing Projects into Workspace

Tercero, importar el proyecto de inet seleccionando la carpeta Inet4.3

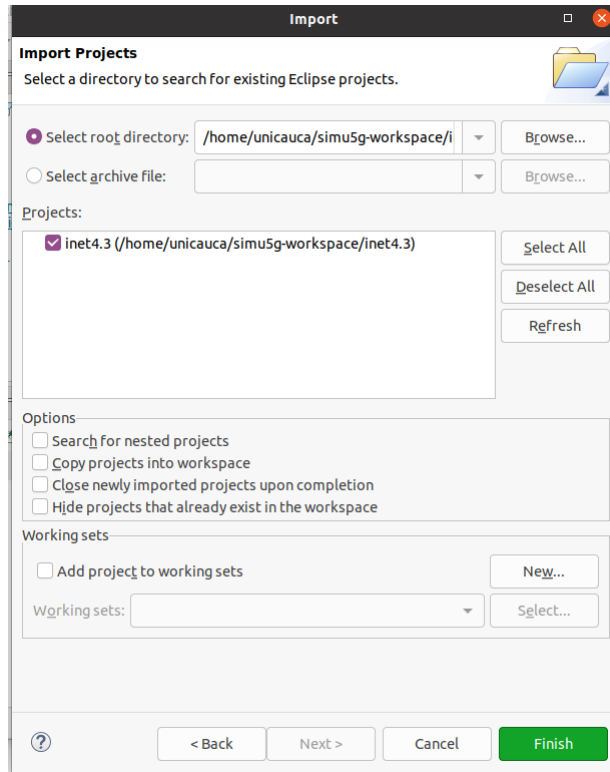


Figura B.12: Importar la dirección del directorio Inet4.3

Y finalmente, importar Simu5G con los mismos pasos anteriormente mencionados para Inet4.3. Con ello ya se tendría los proyectos en el IDE en caso de necesitarlo.

Anexo C

Configuración de Wowza

Para su instalación, se ingresa a la página oficial de Wowza (<https://www.wowza.com/pricing/installer>), se descarga el instalador para el sistema operativo correspondiente, y se completa el proceso con la licencia dada. Finalizado lo anterior, se debe ingresar al servidor desde el navegador, con la url: “<http://localhost:8088/enginemanager/login.htm>”, donde se debe iniciar sesión con el usuario creado previamente en la instalación.

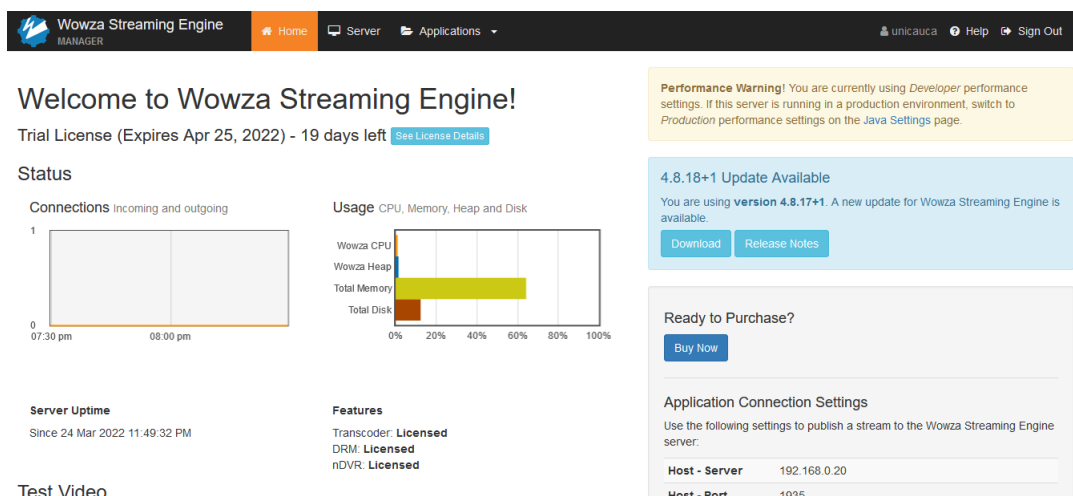


Figura C.1: Página inicial del servidor wowza

Para crear una nueva aplicación, se debe ingresar al menú “Application” y seleccionar “Live” donde se ingresa el nombre de la aplicación

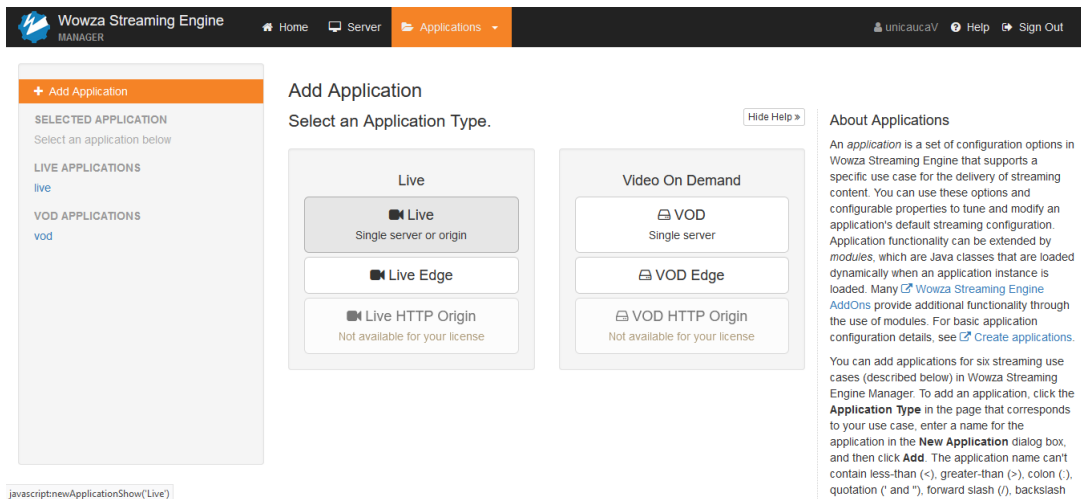


Figura C.2: Crear nueva aplicación en Wowza

A continuación, se debe ingresar al menú “Server” y seleccionar en la parte lateral izquierda de la pantalla “Source Authentication”, enseguida llenar los campos que se muestran en la siguiente imagen para ayudar a proteger las conexiones de origen basadas en RTMP y RTSP.

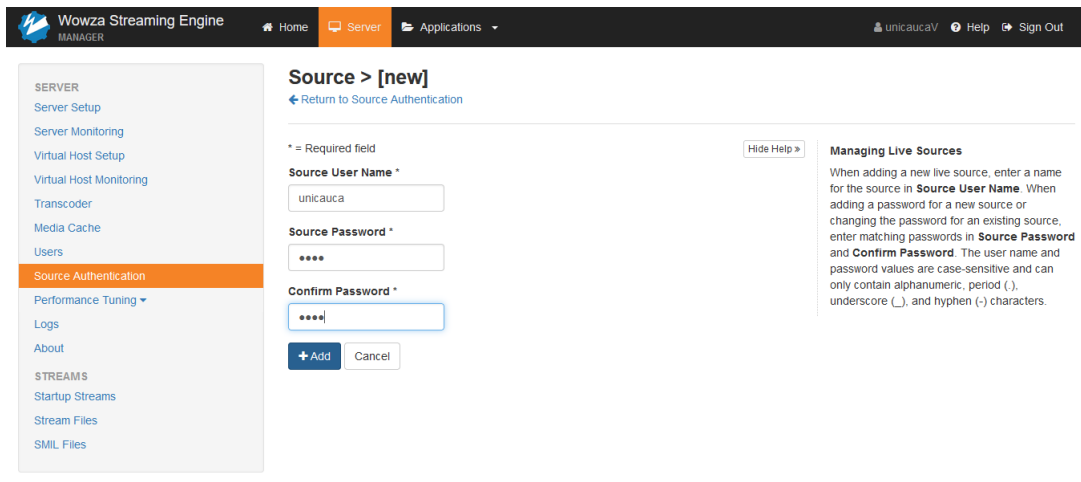


Figura C.3: Autenticación de origen Wowza

Y para finalizar, se regresa a “Applications”, se da click en “Sources (Live)” y se copia el Host-Server y Host-Port para una configuración necesaria en OBS.

The screenshot displays the Wowza Streaming Engine Manager interface. At the top, the navigation bar includes 'Wowza Streaming Engine MANAGER', 'Home', 'Server', and 'Applications'. The user is logged in as 'unicauca'. The left sidebar shows a menu with 'Sources (Live)' selected. The main content area is titled 'Telesurgery > Sources (Live)' and contains instructions for setting up an encoder or camcorder. A grid of nine encoder/camcorder logos is shown, each with a 'Learn more...' link. The right-hand panel, 'Application Connection Settings', provides fields for:

- Host - Server: 192.168.0.20
- Host - Port: 1935
- Application: Telesurgery
- Stream Name: The stream name you want to use
- Login: A valid source user name and password

Figura C.4: Configuración de conexión Wowza

Anexo D

Configuración de OBS

Para la instalación, se ingresa a la página oficial de OBS (<https://obsproject.com/es>) y se descarga el instalador de acuerdo al sistema operativo correspondiente. Finalizado el proceso, se ingresa y se da click en “Ajustes” ubicado en la parte inferior derecha, como se evidencia en la Figura D.1.

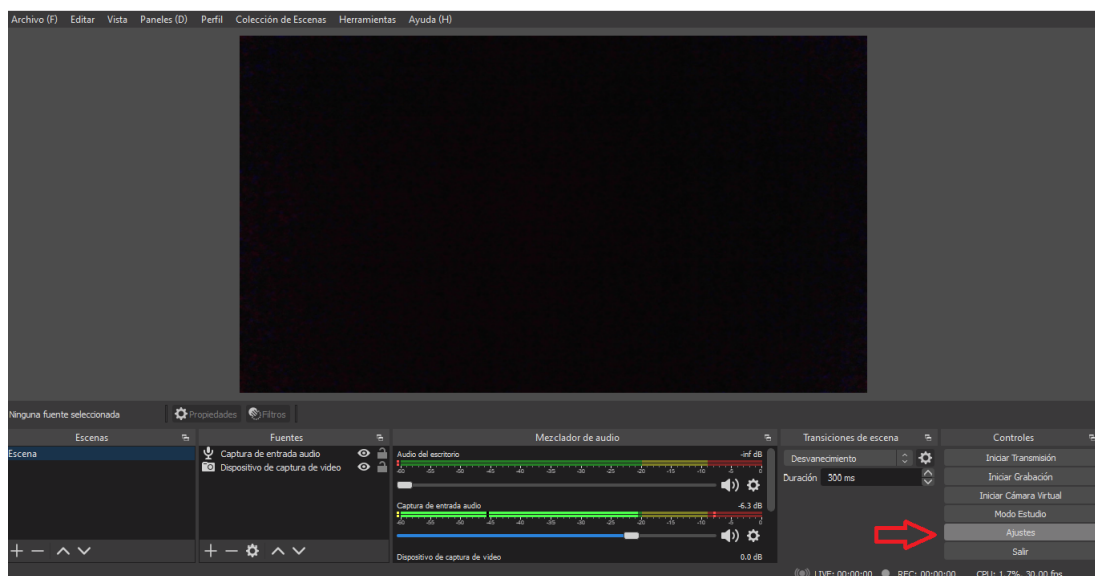


Figura D.1: Configuración en OBS parte 1

Luego se da click en “Emisión” y se llenan los siguientes datos evidenciados en la Figura D.2 (tener en cuenta el Host-Server, Host-Port y nombre de la aplicación asignados en Wowza)

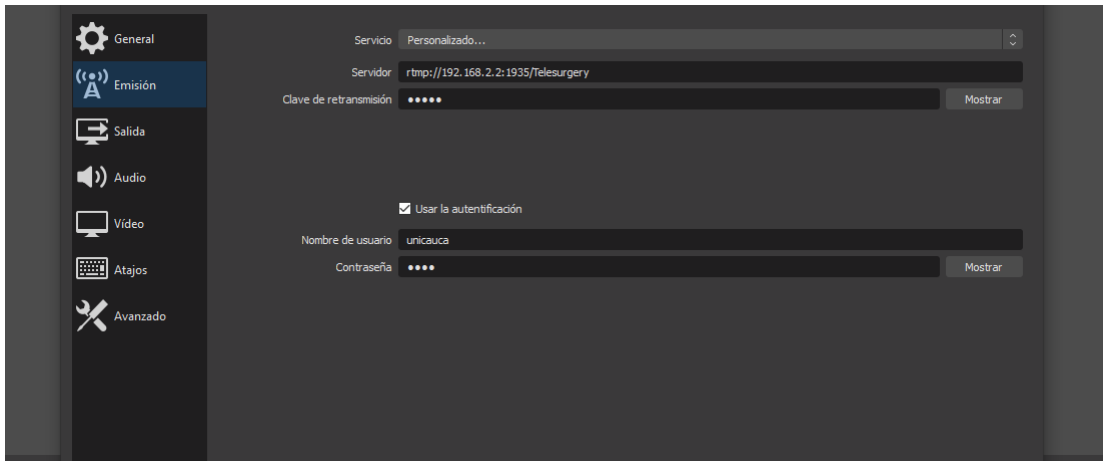


Figura D.2: Configuración en OBS parte 2

Al guardar los ajustes, ya se puede iniciar transmisión.

Anexo E

Experimento de calidad de video

CARTA DE INSTRUCCIONES

Experimento de calidad de video

Instrucciones

Buen día, gracias por estar aquí y participar de este estudio. El propósito de este experimento es recopilar las percepciones individuales de la calidad de varios archivos de vídeo cortos. Esto nos ayudará a evaluar la calidad de experiencia para el servicio de Live Video Streaming sobre una red 5G.

Las secuencias se presentarán de forma aleatoria para que según su criterio juzgue la calidad percibida del vídeo. En este experimento usted verá secuencias de vídeo cortas de 50 segundos, cada vez que se reproduzca una secuencia se le pedirá que juzgue la calidad de la misma. Dispone de 10 segundos para calificar la secuencia de vídeo, cada vez que se muestre una secuencia usted debe juzgar su calidad utilizando uno de los cinco niveles de la siguiente escala:

- 5 Excelente
- 4 Buena
- 3 Aceptable
- 2 Mediocre
- 1 Mala

Debe registrar su criterio de la calidad del vídeo en la hoja de calificaciones que se le proporcionará, según el nombre del video que ha observado. Para determinar su criterio de calidad, tenga en cuenta: la borrosidad, la continuidad del movimiento, si se presenta parpadeo. Observe

detenida y cuidadosamente toda la secuencia antes de emitir su juicio. No tenga en cuenta el contenido del vídeo. Recuerde está evaluando la calidad del vídeo. Hágase la pregunta ¿Qué pensaría sobre la calidad de la secuencia si la viera en un teléfono móvil o pantalla de TV?

No se preocupe por dar la respuesta incorrecta de alguna manera; No hay respuesta correcta o incorrecta.

¿Tiene alguna pregunta antes de que inicio el experimento?

CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN SUBJETIVA (ACR) – MOS

Fecha -----

Edad: ---

Género: M / F

Después de visualizar el vídeo, marca con una “X” el valor que creas oportuno de acuerdo a la calidad de vídeo observado.

VALOR	CALIDAD VISUAL	VIDEO A	VIDEO B	VIDEO C	VIDEO D
5	Excelente				
4	Buena				
3	Aceptable				
2	Mediocre				
1	Mala				

Tabla E.1: Prueba de la evaluación Subjetiva (ACR) – MOS

Anexo F

Artículo

El artículo realizado en este trabajo de investigación se encuentra en el siguiente enlace: [Artículo](#)