

MODELADO DE TRÁFICO PARA EL SERVICIO DE STREAMING DE VIDEO EN VIVO - LVS EN REDES MÓVILES LTE CON CALIDAD DE LA EXPERIENCIA



HECTOR FABIO BERMUDEZ OROZCO

Tesis de doctorado en Ingeniería Telemática

Director:

PhD. José Luis Arciniegas Herrera
Doctorado en Ingeniería de Sistemas Telemáticos

Codirector:

PhD. Wilmar Yesid Campo Muñoz
Doctorado en Ingeniería Telemática

Popayán, Marzo 2020

HECTOR FABIO BERMUDEZ OROZCO

MODELADO DE TRÁFICO PARA EL SERVICIO DE
STREAMING DE VIDEO EN VIVO- LVS EN REDES
MÓVILES LTE CON CALIDAD DE LA EXPERIENCIA

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del Título de:

Doctor en:
Ingeniería Telemática

Director:
PhD. José Luis Arciniegas Herrera
Doctorado en Ingeniería de Sistemas Telemáticos

Codirector:
PhD. Wilmar Yesid Campo Muñoz
Doctorado en Ingeniería de Sistemas Telemáticos

Popayán, Marzo 2020

*A Dios, por la vida y múltiples bendiciones.
A Criss, Sofy y David, siempre serán mi motor.
A toda mi familia por su continuo apoyo.*

Agradecimientos

Primero que todo al creador, gracias Dios por darme la sabiduría y temple necesario para enfrentar esta importante y enriquecedora etapa en mi vida.

En esta etapa son muchas las personas que me han colaborado y apoyado para lograr llegar a la meta. Inicialmente a mi amada familia: Criss, Sofía y David por estar siempre ahí conmigo en todo momento, los amo. A mis padres: Omar y Marlene por su constante aliento, igualmente a mis hermanos Juan Carlos y Claudia Vanessa y toda mi hermosa y gran familia.

Gracias a mis tutores José Luis Arciniegas y Wilmar Yesid Campo, juntos construimos un hermoso trabajo, que hoy me llena de orgullo y satisfacción.

Gracias a María Dolores Cano y Ramón Sánchez por su acogida en mi estancia internacional, por brindarme la posibilidad de trabajar con ustedes y crecer durante la pasantía. Además del conocimiento, fueron muchos los momentos que viví en compañía de mi familia en la inolvidable Cartagena Murcia...

Gracias a Claudia, Víctor, Harold y Amparo por acogerme en sus hogares, cuando me tocó pernotar en la hermosa ciudad blanca, me hicieron sentir como en casa.

Gracias a mis profesores y compañeros del doctorado, fueron gratos y gratificantes los momentos vividos.

Gracias a mi Universidad del Quindío, Universidad del Cauca y a Colciencias por su apoyo económico.

En general a todas las personas que de una u otra forma aportaron a que este sueño hoy sea una realidad, mil y mil gracias...

Resumen estructurado

Los servicios de transmisión de video se han convertido en el servicio más consumido por los usuarios finales en redes móviles. Esto ha llevado a un incremento inusual del tráfico de datos sobre estas redes, generado inconvenientes a los operadores de telecomunicaciones y obligándolos a desarrollar una serie de mecanismos de red que permitan proporcionar a los usuarios finales los niveles de calidad exigidos. Para realizar esta tarea, es necesario disponer de herramientas que permitan conocer el comportamiento del tráfico, una de ellas es la caracterización del tráfico mediante modelos. Por otro lado, se requiere contar con técnicas de transmisión de video eficientes, que puedan soportar los altos niveles de tráfico y que proporcione a los usuarios finales del servicio una calidad satisfactoria al utilizar el servicio contratado. Esta tesis doctoral presenta un estudio del modelado de tráfico y la evaluación de la Calidad de la Experiencia – QoE para el servicio de streaming de video en vivo - LVS soportado por redes LTE. El modelo de tráfico presentado tiene dos enfoques: uno desde la perspectiva de la emulación y el otro desde la perspectiva del modelado analítico. Para el primero se propone un escenario de emulación basado en el simulador NS3-LENA el cual intercambia tráfico con dispositivos reales. El segundo enfoque, presenta las funciones de densidad de probabilidad – PDF que caracterizan el comportamiento estadístico de las componentes de video y audio, específicamente de las componentes del *Group of Picture* - GOP. Además, en este trabajo doctoral, se propone una herramienta computacional para la implementación de la Recomendación ITU-T P.1203 que permita estimar la QoE. La herramienta computacional propuesta es utilizada para realizar una comparación del desempeño de diferentes técnicas de streaming adaptativo a partir de métricas de QoE para el servicio bajo estudio. Además, en el proceso de validación se utiliza una prueba subjetiva, donde se compara mediante el coeficiente de Pearson, los resultados obtenidos con la herramienta propuesta y con otras presentadas para estimar la QoE. Finalmente, se presenta un estudio comparativo a partir de parámetros de QoE que involucra elementos claves de la arquitectura LTE, como es el caso los bloques de recursos físicos – PRB y número de usuarios.

Structured abstract

Video-streaming services have become the most consumed service by end-users in mobile networks. This has led telecommunication operators to develop a series of networking mechanisms that allow to provide end-users with the demanded levels of quality. To perform this task, it is necessary to have tools that allow to know the traffic behavior, one of them is the characterization of traffic through models. On the other hand, it is required to have efficient video transmission techniques that can withstand high levels of traffic and provide end-users with satisfactory quality when using the contracted service. This doctoral thesis presents a study of traffic modeling and the evaluation of the Quality of Experience - QoE for the live video streaming service - LVS supported by LTE networks. The traffic model presented has two approaches: one from the perspective of emulation and the other from the perspective of analytical modeling. For the first one, an emulation scenario based on the NS3-LENA simulator is proposed, which exchanges traffic with real devices. The second approach presents the probability density functions - PDF that characterize the statistical behavior of the video and audio components, specifically of the Group of Picture - GOP components. In addition, in this doctoral work, a computational tool is proposed for the implementation of ITU-T Recommendation P.1203 that allows estimating QoE. The proposed computational tool is used to compare the performance of different adaptive streaming techniques based on QoE metrics for the service under study. In addition, a subjective test is used in the validation process, where the results obtained with the proposed tool and with others presented to estimate the QoE are compared using the Pearson coefficient. Finally, a comparative study is presented based on QoE parameters that involve key elements of the LTE architecture, such as physical resource blocks - PRB and number of users.

Contenido

Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiv
Lista de siglas.....	xvi
1. Introducción.....	1
1.2 Motivación.....	5
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 General.....	7
1.3.2 Específicos	7
1.4 Metodología	8
1.5 Estructura del documento	9
2. Marcos de referencia.....	11
2.1 Marco teórico	11
2.1.1 Tecnología Streaming	11
2.1.2 Calidad de la Experiencia - QoE.....	12
2.1.3 Indicadores de desempeño clave - KPI para QoE.....	13
2.1.4 Métricas de QoE.....	14
2.1.5 Redes <i>Long Term Evolution</i> - LTE	14
2.1.6 Modelado de tráfico	15
2.2 Marco de antecedentes	16
2.2.1 Evaluación de la calidad de video	16
2.2.2 Servicios de Video <i>Streaming</i>	22
2.2.3 Modelado de Tráfico.....	26
3. Escenarios de experimentación	35
3.1 Escenario de Emulación	36

3.1.1 Reproductor de <i>streaming</i> adaptativo.....	39
3.2 Escenario real.....	41
3.2.1 Escenario real: ambiente para interiores	43
3.2.2 Escenario real: ambiente para exteriores	44
3.3 Validación de los escenarios de experimentación	45
3.3.1 Validación de los escenarios de experimentación en interiores	47
3.3.2 Validación de los escenarios de experimentación en exteriores	56
3.4 Conclusiones preliminares.....	66
4. Caracterización del Tráfico del Servicio de <i>Live Video Streaming</i>	67
4.1 Introducción	67
4.2 Caracterización del tráfico del servicio de LVS.....	68
4.2.1 Lectura de la información de las trazas capturadas.	69
4.2.2 Analizador sintáctico.....	70
4.2.3 Identificar las funciones de densidad de probabilidad – PDF	73
4.3 Modelo de tráfico	78
4.4 Conclusiones preliminares.....	85
5. Medición de la Calidad de la Experiencia – QoE del servicio de LVS en redes LTE	87
5.1. Medición de la calidad de la experiencia - QoE	88
5.2 Estimación de la QoE Objetiva	88
5.2.1 Recomendación ITU.T – P1203 [19]	88
5.2.2 Herramienta Software diseñada para la medición de la QoE	90
5.2.3 Extracción de parámetros de búfer.....	94
5.2.4 Estimación de la QoE objetiva en los diferentes escenarios de experimentación	95
5.3 Estimación de la QoE Subjetiva.....	116
5.3.1 Experimento realizado en la Universidad del Quindío	116
5.3.2 Descripción del escenario de obtención de vídeos.....	117

5.3.3 Selección de secuencias	118
5.3.4 Diseño del experimento	118
5.3.5 Observadores	119
5.3.6 Condiciones de Evaluación	119
5.3.7 Análisis Estadístico y notificación de resultados	121
5.4 Validación de la herramienta propuesta para la estimación de QoE objetiva	124
5.5 Conclusiones preliminares	126
6. Validación a partir de la capa física LTE y parámetros de QoE	129
6.1 Generalidades de la capa física de LTE	130
6.2 Estimación de la QoE frente a la variación de parámetros de la capa física de LTE	132
6.3 Conclusiones preliminares	138
7. Conclusiones y trabajo futuro	141
7.1 Resumen de las contribuciones	143
7.1.1 Contribuciones a nivel de modelado	144
7.1.2 Contribuciones a nivel de metodologías de evaluación de la calidad del vídeo	145
7.2 Trabajo Futuro	146
7.3 Aportes principales	147
7.3.1 Publicaciones	147
7.3.2 Trabajos de grado	150
7.3.3 Pasantías	150
Bibliografía	151
A. Conceptos básicos y análisis sistemático	163
A.1 Streaming tradicional	163
A.2 <i>Streaming</i> de descarga progresiva	164
A.3 Streaming adaptativo	164

A.3.1 <i>HTTP Smooth Streaming</i> – HSS [5].....	165
A.3.2 <i>HTTP Live Streaming</i> – HLS [6].....	166
A.3.3 <i>HTTP Dynamic Streaming</i> – HDS [7].....	166
A.3.4 <i>Dynamic Adaptive Streaming over HTTP</i> – DASH [8].....	166
A.4 Métodos para estimar la QoE	167
A.4.1 Métodos subjetivos	167
A.4.2 Métodos Objetivos	167
A.4.3 Métodos Indirectos.....	167
A.5 Métricas de QoE	167
A.6 Redes Long Term Evolution - LTE.....	168
A.7 Enfoques del Modelado de tráfico	171
A.7.1 Bancos de prueba	172
A.7.2 Simulación	172
A.7.3 Ambientes de emulación.....	172
A.7.4 Modelos matemáticos o analíticos	173
A.8 Análisis Sistemático.....	173
A.8.1 Planeación de la revisión	173
B. Configuración de Escenarios de Experimentación.....	181
B.1 Escenario de Emulación	181
B.1.1 Red LTE simulada con NS3.....	181
B.1.2 Modificaciones a la librería LENA de NS3	187
B.1.3 Configuración del Wowza	190
- <i>Creación de la Aplicación del servicio en vivo</i>	191
- <i>Configuración de Archivos Smill para soporte de Streaming Adaptativo</i>	193
B.1.4 Configuración <i>Contenido multimedia a transmitir</i>	194
B.1.5 Configuración de aplicaciones para la reproducción de video basada en web desarrollada con HTTP Apache	196
B.2 Escenario Real	201

B.2.1 R&S CMW500 generador de señales.....	202
B.2.2 Configuración de la DAU (Data Application Unit)	208
B.2.3 Establecimiento de la comunicación inalámbrica	209
C. Pruebas ANOVA	211
C.1 Prueba ANOVA para escenarios <i>Outdoor</i>	211
C.1.1 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro <i>Packet loss</i> con el protocolo RTMP en el lado del Cliente	212
C.1.2 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Interpacket delay con el protocolo RTMP en el lado del Cliente	216
C.1.3 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Jitter con el protocolo RTMP en el lado del Cliente	219
C.1.4 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Throughput con el protocolo RTMP en el lado del Cliente	223
D Herramientas de apoyo para el modelado de tráfico.....	229
D.1 Analizador sintáctico.....	229
D.2 Pruebas de bondad y ajuste	230
D.3 Pruebas de K-S	233
D.3.1 Cálculo de similitud entre la CDF real y la CDF de la Hipótesis H_0	234
D.3.2 Resultados de las pruebas K-S	235
D.4 Parámetros de las funciones de densidad de probabilidad.....	305
F. Estimación de la QoE.....	307
F.1 Módulos integrantes de la recomendación ITU.T P.1203	307
F.2 Test de Ishihara para medir normal visión de colores	312
F.3 Test para medir agudeza visual.....	316
F.4 Formularios de consentimiento.....	319
F.5 Cuestionario de la evaluación.....	322

Lista de figuras

Figura 1.1. Modelo metodológico	8
Figura 2.1. Factores que afectan la QoE [27].....	13
Figura 2.2. Arquitectura de la tecnología LTE [34]	15
Figura 2.3. Ejes temáticos para la revisión sistemática.....	16
Figura 3.1. Esquema general del escenario de Emulación	37
Figura 3.2. Implementación del escenario emulado en los laboratorios de la UPCT	38
Figura 3.3. Diagrama de flujo de reproductor de streaming adaptativo.....	40
Figura 3.4. Reproductor de streaming para DASH.....	41
Figura 3.5. Analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500.....	42
Figura 3.6. Esquema del escenario real para ambientes de interiores.....	43
Figura 3.7. Implementación en el laboratorio de la UPCT del escenario real para ambientes de interiores	44
Figura 3.8. Esquema del escenario real para ambientes de exteriores.....	44
Figura 3.9. Implementación en patios del campus muralla del mar de la UPCT del escenario real para ambientes de exteriores.....	45
Figura 3.10. Métricas de QoS (<i>interpacket delay, jitter and throughput</i>) con RTMP en el servidor.....	49
Figura 3.11. Métricas de QoS (<i>packet loss, interpacket delay, jitter and throughput</i>) con RTMP en el cliente	50
Figura 3.12. Métricas de QoS (<i>interpacket delay, jitter and throughput</i>) con RTSP en el servidor.....	51
Figura 3.13. Métricas de QoS (<i>packet loss, interpacket delay, jitter and throughput</i>) con RTSP en el cliente.....	51
Figura 3.14. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTMP con <i>Nakagami-m</i> (<i>m=1</i>).....	54

Figura 3.15. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con <i>Nakagami-m</i> ($m=1$).....	54
Figura 3.16. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTSP con <i>Nakagami-m</i> ($m=1$).....	55
Figura 3.17. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTSP con <i>Nakagami-m</i> ($m=1$).....	55
Figura 3.18. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con <i>Nakagami-m</i> ($m=0.5$).....	56
Figura 3.19. Métricas de QoS (<i>interpacket delay</i> , <i>jitter</i> y <i>throughput</i>) con RTMP en el servidor.....	58
Figura 3.20. Métricas de QoS (<i>packet loss</i> , <i>interpacket delay</i> , <i>jitter</i> y <i>throughput</i>) con RTMP en el cliente	58
Figura 3.21. Métricas de QoS (<i>interpacket delay</i> , <i>jitter</i> y <i>throughput</i>) con DASH en el servidor.....	60
Figura 3.22. Métricas de QoS (<i>packet loss</i> , <i>interpacket delay</i> , <i>jitter</i> y <i>throughput</i>) con DASH en el cliente	60
Figura 3.23 Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTMP con <i>Nakagami-m</i> ($m=5$).....	62
Figura 3.24. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con <i>Nakagami-m</i> ($m=5$).....	63
Figura 3.25. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo protocolo DASH con <i>Nakagami-m</i> ($m=5$).....	63
Figura 3.26. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo DASH con <i>Nakagami-m</i> ($m=5$).....	65
Figura 3.27. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo DASH con <i>Nakagami-m</i> ($m=3$).....	65
Figura 4.1. Esquema funcional del proceso de caracterización o modelado estadístico de tráfico.....	69
Figura 4.2. Exportar archivos planos tipo texto con <i>wireshark</i>	70

Figura 4.3. Total de paquetes capturados en un test con wireshark	71
Figura 4.4. Diagrama de Flujos del analizador sintáctico del servicio de LVS	72
Figura 4.5. Pantallazo de datos de entrada del analizador sintáctico propuesto.....	73
Figura 4.6. Histograma y diferentes PDF generadas con el toolbox <i>dfittool</i> de Matlab	74
Figura 4.7. Representación de D a partir de la POA y PEA	76
Figura 4.8. Diagrama de cajas - bigotes.....	77
Figura 4.9. Salida del generador sintáctico	78
Figura 4.10. Histograma de diferencia de tiempos de slices P y las PDF de las posibles H ₀	79
Figura 4.11. POA de slices de diferencia de tiempos y la PEA de las H ₀	80
Figura 4.12. Parámetros de la función de distribución <i>Inverse Gaussian</i> obtenida con <i>dfittool</i>	81
Figura 5.1. Módulos de la ITU-T P.1203 [18] (I= <i>Input</i> ; O= <i>Output</i>).....	89
Figura 5.2. Algoritmo implementado para aplicar el modelo ITU-T P.1203	91
Figura 5.3. Estimación de QoE promedio utilizando la Rec. UIT-T Modelo P.1203 (incluidos los intervalos de confianza con $\alpha = 0.05$) para diferentes modelos de propagación, resoluciones y protocolos (a. 480 y b. 720)	98
Figura 5.4. Estimación de QoE promedio utilizando la Rec. UIT-T Modelo P.1203 (incluidos los intervalos de confianza con $\alpha = 0.05$) para diferentes modelos de propagación, resoluciones y protocolos. (a. RTMP y b. DASH)	99
Figura 5.5. Compación del número promedio de eventos de <i>stalling</i> y su duración (ambas métricas incluyen intervalos de confianza $\alpha = 0.05$) para el QoE- MOS (0.46), Pa (0.21) y Pv (0.22) obtenidos del ITU-T Rec. Modelo P.1203.....	101
Figura 5.6. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de <i>delay</i> . Escenario 1	104
Figura 5.7. Eventos de <i>stalling</i> obtenidos con diferentes valores de <i>delay</i> . Escenario 1	104
Figura 5.8. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de <i>delay</i> . Escenario 1 ...	105
Figura 5.9. QoE y <i>Delays</i> para diferentes técnicas de <i>streaming</i> adaptativo en el escenario 1.....	105
Figura 5.10. Evolución de los parámetros de QoS con diferentes valores de <i>packet loss</i> . Escenario 1	106
Figura 5.11. Eventos de <i>stalling</i> obtenidos con diferentes valores de <i>packet loss</i> . Escenario 1	106
Figura 5.12. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de <i>packet loss</i> . Escenario 1	107

Figura 5.13. QoE y PLR para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 1.....	107
Figura 5.14. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de delay. Escenario 2	109
Figura 5.15. Eventos de <i>stalling</i> obtenidos con diferentes valores de <i>delay</i> . Escenario 2	109
Figura 5.16. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de <i>delay</i> . Escenario 2 ..	109
Figura 5.17. QoE y <i>Delays</i> para diferentes técnicas de <i>streaming</i> adaptativo en el escenario 2.....	110
Figura 5.18. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de <i>packet loss</i> . Escenario 2	111
Figura 5.19. Eventos de <i>stalling</i> obtenidos con diferentes valores de <i>packet loss</i> . Escenario 2	112
Figura 5.20. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de <i>packet loss</i> . Escenario 2	112
Figura 5.21. QoE vrs. <i>Packet loss</i> para diferentes técnicas de <i>streaming</i> adaptativo en el escenario 2	113
Figura 5.22. Ubicación del <i>UE</i> frente al <i>eNB</i>	113
Figura 5.23. Parámetros de QoS para diferentes técnicas de <i>streaming en el escenario 3</i>	114
Figura 5.24. <i>KPI's</i> de QoE para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 3.....	115
Figura 5.25. QoE para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 3	115
Figura 5.26. Diagrama de presentación de secuencias ITU-T P.910	117
Figura 5.27. Evaluación de QoE para diferentes categorías de video y valores de retardo	123
Figura 5.28. Estimación de QoE mediante diferentes métodos.....	124
Figura 6.1. Bloque de recursos físicos: PRB [132].....	131
Figura 6.2. Esquema general del escenario de emulación y generador de tráfico..	133
Figura 6.3. Configuración <i>D-ITG</i> para la generación de tráfico – <i>ITGSend</i>	133
Figura 6.4. Configuración <i>D-ITG</i> para recepción de tráfico - <i>ITGRecv</i>	134
Figura 6.5. Resumen de la transmisión con el D-ITG utilizando el componente ITGLog	134
Figura 6.6. Monitoreo de interfaces del PC1 a través de IPTraf.....	135
Figura 6.7. <i>KPI's</i> (duración y cantidad) de eventos de <i>stalling</i>	136
Figura 6.8. <i>KPI</i> (búfer inicial) de eventos de <i>stalling</i>	137
Figura 6.9. Estimación de QoE en función de cantidad de UE y PRB.....	137

Figura A.1. Interacción cliente-servidor con <i>streaming</i> adaptativo [75]	165
Figura A.2. Enfoques de modelos de tráfico	171
Figura A.3. Estudios de tráfico en diferentes redes de telecomunicaciones	177
Figura A.4. Estudios de tráfico del servicio de video en vivo en redes inalámbricas	178
Figura A.5. Estudio de trafico para servicios de video en redes LTE	179
Figura A.6. Estudios de streaming de video y QoS-QoE en redes LTE	179
Figura A.7. metodología para la estimación de la QoE	180
Figura B.1. Archivo ejecutable shell	182
Figura B.2. Representación gráfica del escenario básico de emulación	187
Figura B.3. Modificaciones al archivo ipv4-list-routing.cc	188
Figura B.4. Modificaciones al archivo epc-sgw-pgw-application.cc	189
Figura B.5. Página inicial del servidor Wowza.....	191
Figura B.6. Configuración de la aplicación del servicio en vivo	192
Figura B.7. Configuración Servicio en vivo.....	192
Figura B.8. Configuración de streaming adaptativo.....	194
Figura B.9. Ventana principal del wirecast	195
Figura B.10. Configuración de salida del wirecast.....	195
Figura B.11. Reproductor HDS.....	199
Figura B.12. Reproductor HLS	200
Figura B.13. Reproductor HSS.....	201
Figura B.14. Configuración hardware del escenario real.....	201
Figura B.15. Primera pantalla del programa.....	203
Figura B.16. Modos de funcionamiento del R&S CMW500.....	204
Figura B.17. Categorías del UE – LTE (Uplink y Downlink)	204
Figura B.18. Bandas de frecuencia LTE/LTE-A (FDD).....	205
Figura B.19. Bandas de frecuencia LTE/LTE-A (FDD/TDD)	205
Figura B.20. Ancho de bandas de canales LTE	206
Figura B.21. Ajuste de parámetros LTE en el CMW500.....	206
Figura B.22. Antenas utilizadas en los escenarios reales. a) indoor. b) outdoor....	208
Figura B.23. Acceso a la configuración de la DAU.....	209
Figura B.24. Generación de señal LTE	209
Figura B.25. Selección de la red móvil desde el UE.....	210
Figura B.26. Conexión establecida entre la estación base y el UE	210
Figura F.1. Láminas del test de Ishira	314
Figura F.2. Test de Snell	317
Figura F.3. Cuestionario de evaluación.....	322

Lista de tablas

Tabla 3.1. Característica de los PC utilizados en el sistema de emulación.....	36
Tabla 3.2. Configuración de escenarios de experimentación en interiores	48
Tabla 3.3. Ajustes de codificación en interiores	48
Tabla 3.4. Resultados de ANOVA para RTMP y RTSP en el Servidor ($F_c=5,31765$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F>F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada	52
Tabla 3.5. Resultados de ANOVA para RTMP y RTSP en el Cliente ($F_c=5,31765$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F>F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada	53
Tabla 3.6. Configuración de escenarios de experimentación en exteriores	56
Tabla 3.7. Ajustes de codificación en exteriores	57
Tabla 3.8. Resultados de ANOVA para RTMP y DASH en el servidor ($F_c=18.5128$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F>F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada	62
Tabla 3.9. Resultados de ANOVA para RTMP y DASH en el cliente ($F_c=18.5128$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F>F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada	64
Tabla 4.1. Resultados de la prueba de K-S para diferentes hipótesis nulas propuestas	81
Tabla 4.2. PDF para para el tamaño de slice de diferentes categorías y escenarios de prueba	83
Tabla 4.3. PDF para el tiempo relativo entre slices de diferentes categorías y escenarios de prueba	85
Tabla 5.1. Factores y rangos de aplicación del estándar UIT-T P.1203.3.....	90
Tabla 5.2. Parámetros RF relacionados con el módulo de machine learning	93
Tabla 5.3. Ejemplo de archivo de eventos de stalling	95
Tabla 5.4. Ejemplo de calculo de factores de $RF_{parameters}$ y $RF_{prediction}$	96
Tabla 5.5. Clasificación de las condiciones de evaluación utilizadas en la QoE subjetiva	120
Tabla 5.6. Valores de QoE para las diferentes SVE.....	122
Tabla 5.7. ANOVA y coeficiente de <i>Person</i> obtenidos en la validación.....	125
Tabla 6.1. Cantidad de PRBs Vrs. la canalización [131]	131
Tabla 6.2. Velocidades pico y canalización [131].....	132

Tabla 6.3. Tráfico generado para diferente número de <i>UE</i> en el sistema de emulación	135
Tabla B.1. Parámetros generales de las antenas utilizadas.....	208
Tabla D.1. Parámetros de definición para PDFs	306
Tabla F.1. Coeficientes del modelo de audio para diferentes codecs	309

Lista de siglas

3GPP:	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AAC:	<i>Advanced Audio Encoding</i>
ACR:	<i>Absolute Category Rate</i>
ANOVA:	<i>ANalysis Of VAriance</i>
BW:	<i>Band Wide</i>
CDF:	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDN:	<i>Content Delivery Network</i>
DASH:	<i>Dynamic Adaptive Streaming over HTTP</i>
DAU:	<i>Data Application Unit</i>
D-ITG:	<i>Distributed Internet Traffic Generator</i>
eNB:	<i>evolved NodeB</i>
EPS:	<i>Evolved Packet System</i>
E-UTRAN:	<i>Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access</i>
FDD:	<i>Frecuency Division Duplexing</i>
GOP:	<i>Group Of Picture</i>
HDS:	<i>HTTP Dynamic Streaming</i>
HLS:	<i>HTTP Live Streaming</i>
HSS:	<i>HTTP Smooth Streaming</i>
HSS:	<i>Home Subscriber Server</i>
HTTP:	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IMSI:	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IPTV:	<i>Internet Protocol Television</i>
ITU-R:	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication</i>
ITU-T:	<i>International Telecommunication Union Telecom</i>
KPI:	<i>Key Performance Indicator</i>
K-S:	<i>Kolmogórov-Smirnov Test</i>
LTE:	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A:	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
LVS:	<i>Live Video Streaming</i>
MIMO:	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME:	<i>Mobility Management Entity</i>
MME:	<i>Mobility Management Entity</i>
MOS:	<i>Mean Opinion Score</i>
MPD:	<i>Media Presentation Description</i>
MPEG:	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MQPM:	<i>Moving Pictures Quality Metric</i>
OFDMA:	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OTT:	<i>Over The Top</i>

PCRF:	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PDF:	<i>Probability Density Functions</i>
PEA:	<i>Probability Expected Accumulated</i>
P-GW:	<i>PDN Gateway</i>
PLR:	<i>Packet Loss Rate</i>
POA:	<i>Probability Observed Accumulated</i>
PRB:	<i>Physical Resource Block</i>
PSNR:	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
PSQA:	<i>Pseudo-Subjective Quality Assessment</i>
QAM:	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE:	<i>Quality of user Experience,</i>
QoS:	<i>Quality of Service</i>
RAN:	<i>Radio Access Network</i>
RSRP:	<i>Reference Signal Received Quality</i>
RSRQ:	<i>Reference Signals Received Power</i>
RTMP:	<i>Real Time Messaging Protocol</i>
RTSP:	<i>Real Time Streaming Protocol</i>
SC-FDMA:	<i>Single Carrier - Frequency Division Multiple Access</i>
S-GW:	<i>Serving Gateway</i>
SSIM:	<i>Structural Similarity Index</i>
TCP:	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD:	<i>Time Division Duplexing</i>
UE:	<i>User Equipment</i>
UMTS:	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USRP:	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
VoD:	<i>Video on Demand</i>
VQA:	<i>Video Quality Assessment</i>
VQEG:	<i>Video Quality Experts Group</i>
VSP:	<i>Video Streaming Problems</i>
XML:	<i>eXtensible Markup Language</i>

Capítulo Primero

1. Introducción

En la actualidad, existe una gran cantidad de suscripciones de usuarios del servicio de videostreaming en las redes de telefonía móvil celular, situación favorecida por las ventajas que brinda la tecnología como 4G, que posibilita a los usuarios finales acceder a una gran cantidad de servicios multimedia como los ofrecidos por YouTube, Facebook, Skype, etc. Las expectativas de crecimiento para este tipo de servicio, presentadas para el año 2024 por la empresa fabricante Ericsson, estima en 136 Exabytes de tráfico de datos móviles por mes para el año 2024, de los cuales el 74% corresponde al servicio de video y donde el 60% de usuarios utilizarán la tecnología de acceso inalámbrica LTE (*Long Term Evolution*). A pesar del lanzamiento de la tecnología 5G, LTE seguirá siendo la tecnología de acceso móvil dominante por suscripción en el futuro inmediato, y se proyecta que a nivel mundial contará con casi 5 mil millones de suscripciones a fines de 2024 [1]. En este contexto, y en respuesta a los altos niveles de tráfico en las redes inalámbricas actuales y proyectadas, es necesario que los operadores de telecomunicaciones adopten decisiones que garanticen condiciones mínimas en la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios; por lo cual es de gran importancia, en las actividades de gestión de las redes y recursos, contar con herramientas tales como los modelos de tráfico, que caractericen el comportamiento de tráfico. Por otra parte, a pesar de que existen modelos matemáticos y ambientes de simulación que han permitido caracterizar el tráfico de datos en redes inalámbricas, los mismos carecen de información veráz de las condiciones reales del entorno [2]. Como respuesta a la anterior situación, en la actualidad hay un gran interés de parte de las comunidades académica y científica en el uso y desarrollo de plataformas de prueba de sistemas de comunicaciones que consideren condiciones de funcionamiento reales. En este contexto, los modelos de tráfico que son obtenidos de entornos reales de funcionamiento, tienen un alto grado

de aceptación, además permiten caracterizar el comportamiento del tráfico en las redes sin afectar el funcionamiento de los sistemas en ejecución [3].

Adicional a la situación de incremento de tráfico y de forma complementaria, es primordial contar con técnicas de transmisión de video altamente eficientes en términos de las demandas de recursos de red en el momento en que deben proporcionar niveles satisfactorios de calidad a los usuarios finales. Por tanto, es necesario que los algoritmos de transporte de video permitan su ajuste en tiempo real a una amplia variedad de aspectos de red, que determinan en gran medida la calidad percibida por el usuario final, esto es, la calidad de la experiencia (*Quality of user Experience*, QoE). La técnica de *streaming*, que soporta estos requerimientos, y que es empleada para dar soporte a los servicios de vídeo, específicamente el servicio de video bajo demanda (VoD – *Video on Demand*) y video en vivo (LVS - *Live Video Streaming*), hacen uso del protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) [4]. A su vez, El HTTP streaming es mejorado utilizando técnicas de streaming adaptativo. Entre las técnicas más populares para la reproducción de streaming adaptativo se encuentran: el protocolo *HTTP Smooth Streaming* – HSS [5], *HTTP Live Streaming* – HLS [6], *HTTP Dynamic Streaming* – HDS [7] y el protocolo *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* (DASH), este último se convierte en un estándar internacional ISO/IEC 23009-1:2012 en abril de 2012 adoptado por *3rd Generation Partnership Project* - 3GPP, el cual corresponde a la organización encargada del desarrollo de las redes LTE [8].

En la tarea de monitorizar la calidad del usuario final del servicio, las mediciones de la QoE son altamente valoradas, ya que proporcionan información clave a los diferentes interesados involucrados, por ejemplo, proveedores de servicios, administradores de redes o productores de contenido, entre otros. Por lo tanto, la academia como la industria están centrando su atención y sus esfuerzos en este campo [9]. Adicionalmente, dado que los servicios de video evolucionan continuamente, es necesario que las metodologías para monitorear la QoE también lo hagan.

A partir de lo anterior, la meta que se persigue en la elaboración de esta tesis de doctorado, es proponer un modelado de tráfico para el servicio de *Streaming* de video en vivo sobre redes móviles LTE, en donde se tengan en cuenta la percepción final del usuario del servicio. Se pretende que dicho insumo permita a los operadores de red contar con una herramienta donde se pueda probar y ajustar posibles desarrollos y mejoras que se le realicen a las infraestructuras de redes y a las técnicas de

transmisión actuales y futuras. Adicionalmente, la herramienta diseñada, brindará la posibilidad de estimar la calidad de la Experiencia del servicio de LVS que un usuario final podría experimentar.

Finalmente, los resultados presentados en este trabajo doctoral, han sido publicados, en su gran mayoría, en diferentes revistas y *proceeding* de varios congresos. A continuación, se relacionan las publicaciones realizadas:

Revistas:

- H.F. Bermúdez, J.L. Arciniegas, E. Astaiza, State of the art of QoE assessment methods, and emulation environments for the video service in LTE networks, *Entre Cienc. E Ing.* 10 (2016) 66–75.
Categoría Colciencias: B (Vigencia: 15 de septiembre 2017).
- Bermudez, H.-F., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., Campo, W. Y., & Cano, M.-D. (2019). Statistical validation of an LTE emulation tool using live video streaming over reliable transport protocols. *Telecommunication Systems*, 71(3), 491–504. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0521-6>
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 1,707 (Q3), category TELECOMMUNICATIONS, position 54/88.
- Bermudez, H.-F., Martinez-Caro, J.-M., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., & Cano, M.-D. (2019). Live video-streaming evaluation using the ITU-T P.1203 QoE model in LTE networks. *Computer Networks*, 165, 106967. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106967>
Categoría Colciencias: A1 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 3,030 (Q1), category COMPUTER SCIENCE, HARDWARE & ARCHITECTURE position 13/53
- Bermudez, H.-F., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., Campo, W. Y., & Cano, M.-D. (2019). Study of Indoor Propagation Models in an Emulated LTE Network. *IET Communication*. Article in Press. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.0365>
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 1,779 (Q3), category ELECTRICAL & ELECTRONIC ENGINEERING, position 153/266

- W.Y. Campo, H.-F. Bermudez, E. Astaiza, Characterization of traffic of the video streaming service based on lexical analyzers, *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* 26 (2018) 448–458. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000300448>
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2017 - Dic 2019).
SJR: 0,18 – Q2 (2018), H Index 8

Proceeding

- H.-F. Bermudez, Traffic Model for LVS in LTE Mobil Networks with QoE. In proceeding of 2016 IEEE 11th Colombian Computing Conference, 2016. <http://doi.org/10.1109/ColumbianCC.2016.7750797>
- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L.Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2017). Performance Validation of NS3-LTE Emulation for Live Video Streaming under QoS Parameters. In In proceeding of the 13th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, (pp. 300-307), Rome, Italy. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115836>
- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L.Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2018). Comparative Study of Adaptive Streaming Techniques in LTE Networks Using QoE Metrics. In proceeding of 2018 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI) (pp. 1–6), Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587101>
- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L. Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2018). Análisis de Técnicas de Streaming Adaptativo en Entornos LTE mediante ITU-T P.1203, in 2018 IV Workshop QoS, QoE en Comunicaciones Multimedia (QQCM'18), Zaragoza, Spain.

1.2 Motivación

Para la prestación de los servicios de video (LVS o VoD), se utilizan técnicas de *streaming* a través de un proveedor de servicios de internet. El éxito del servicio de streaming de video se enfoca en que el usuario despliegue en su dispositivo el contenido con un mínimo de fallas y retrasos; actualmente la técnica de *streaming* de video enfrenta varios problemas, los cuales se han denominado los Problemas del Video *Streaming*- VSP [10], entre los cuales se tienen:

- Las personas experimentan insuficiencia de ancho de banda - BW.
- Los usuarios no son pacientes para esperar algunos segundos generados por los retardos en la inicialización.
- Interrupciones temporales de conexiones a redes particulares, debido a movilidad y restablecimiento de la conexión, lo cual introduce retardos adicionales.
- La adaptación de tasa de vídeo involucra problemas de rendimiento tales como la calidad del vídeo variable y baja utilización de BW.

Como consecuencia del aumento de tráfico y los problemas de *streaming* de video - VSP, reiteradamente se presenta un descontento en el uso del servicio de video (LVS y VoD), lo cual conlleva a una baja evaluación de la experiencia por parte del usuario final. En este contexto, para los sistemas de telecomunicaciones, los métodos de medida de calidad para un servicio han evolucionado notablemente; desde el enfoque clásico basado en medidas de Calidad del Servicio - (*Quality of Service* - QoS) que toma en cuenta parámetros de red, hasta los actuales desarrollos sobre la QoE, los cuales se enfocan en medidas del nivel de calidad que el usuario percibe cuando consume un servicio [11],[12]. Adicionalmente, las metodologías propuestas para la evaluación de la QoE, para servicios de vídeo en tiempo real, aún presentan inconvenientes por su alto grado de complejidad y algunos interrogantes en su implementación [13].

Por otro lado, es evidente el potencial de LTE como la red de acceso radio – RAN con mejores condiciones actuales desplegadas; aunque es claro que se debe redimensionar para soportar el tráfico móvil de datos pronosticado por los principales fabricantes y proveedores de servicios de telecomunicaciones a nivel mundial [14]. A pesar de la penetración de las redes LTE y de todos los esfuerzos en infraestructura y desarrollos tecnológicos, se ha encontrado que en la actualidad hacen falta escenarios

de prueba, en donde los desarrolladores e investigadores puedan ejecutar sus prototipos, probar aplicaciones y protocolos, dimensionar y planificar las redes LTE; lo que conducirá a mejorar los VSP y aumentar la calificación de QoE que aquejan actualmente el servicio de vídeo [15].

Frente a estas problemáticas, y como se menciona en la introducción, una herramienta que ayuda al dimensionamiento y planificación de las redes de telecomunicaciones son los modelos de tráfico, ya que facilitan analizar, evaluar y obtener las condiciones necesarias para la implementación de los servicios en entornos reales, garantizando que la red soporte diferentes números de usuarios con distintos requerimientos de información. Además, se puede determinar el impacto de la implementación de nuevos servicios, la previsión oportuna de situaciones no deseadas y posibilitar la realización de pruebas en entornos controlados sin afectar el comportamiento de la red y de los usuarios [16],[17]. Los modelos de tráfico son la base para cualquier evaluación del desempeño de las redes de telecomunicaciones, por lo tanto, deben ser precisos y capaces de captar las características estadísticas del tráfico real [2],[18]. Es importante hacer énfasis en que los estudios de tráfico deben partir de condiciones reales de red, puesto que la mayoría de las configuraciones de servicio y de red disponibles en la literatura se derivan de simulaciones [11]; como es ampliamente conocido, en los procesos de modelado de sistemas de comunicación para simulación, algunos detalles se pueden perder, induciendo a que resultados no sean totalmente fiables [14],[15].

Por lo anterior, la necesidad de crear plataformas de prueba en donde se prueben esas propuestas de mejoras que continuamente se están creando desde la academia y la industria, y que permita que el usuario final del servicio obtenga cada día mejores prestaciones y por ende mayor satisfacción en la utilización del servicio, lo cual se ve reflejado en una mayor aceptación del servicio y una mayor evaluación del mismo. Esta es la motivación de la presente investigación, proporcionar un modelado de tráfico que ayude a realizar estas actividades, y que sirva de insumo a los diferentes actores de las redes en la toma de decisiones tanto de gestión como de recursos.

Dentro de este escenario de motivación y atendiendo a la situación problemática planteada, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo evaluar alternativas de solución a los VSP que afronta el servicio de LVS basadas en condiciones reales de tráfico y que permitan mejorar la calificación de QoE sobre una red LTE emulada?

La investigación que ha dado lugar a esta tesis doctoral responde esta pregunta de investigación, en donde se encuentra el modelo de tráfico para el servicio de LVS soportado por un entorno de emulación LTE, que pretende ser una herramienta que ayude a los diseñadores y planificadores en el adecuado dimensionamiento de las redes LTE. El modelo permitirá probar alternativas de solución de los VSP, ajustar los respectivos parámetros de QoS con los cuales se obtenga el mejor desempeño del servicio. Adicionalmente, utilizar y adecuar las metodologías de mediciones de QoE para redes LTE, tal como la recomendación ITU-T P.1203 [19], la cual se enfoca en la evaluación de calidad paramétrica basada en flujo de bits de descarga progresiva y servicios de transmisión audiovisual adaptativos sobre transporte fiable.

1.3 Objetivos

Para responder la pregunta de investigación antes enunciada se plantean los siguientes objetivos, los cuales serán desarrollados en el contexto de la presente tesis.

1.3.1 General

Obtener el modelo de tráfico basado en un entorno de emulación del servicio de LVS sobre una red LTE, que permita ser utilizado como herramienta de validación a alternativas de solución de un VSP que contribuya al mejoramiento de la QoE.

1.3.2 Específicos

- Obj 1.** Modelar el tráfico del servicio de LVS para una red LTE a partir de un banco de pruebas experimental.
- Obj 2.** Determinar los KPI para QoE del LVS sobre una red LTE emulada.
- Obj 3.** Evaluar el efecto sobre la QoE de las diferentes técnicas de streaming adaptativo para el servicio de LVS sobre una red LTE emulada.

1.4 Metodología

La metodología a seguir para el desarrollo del presente proyecto, está basada en el modelo de investigación tecnológica en ciencias de la ingeniería [20]. Se utilizará el método científico hipotético-deductivo, el cual consiste en emitir una hipótesis acerca de la posible solución del problema planteado y en comprobar con los datos experimentales obtenidos la veracidad de la misma. Lo anterior se compone de cinco etapas, como se aprecian en la

Figura 1.1, las cuales son:

1. Etapa de revisión y análisis del estado del arte.
2. Etapa del planteamiento del problema.
3. Etapa de una posible solución al problema.
4. Etapa de pruebas de la solución.
5. Etapa de presentación de resultados.



Figura 1.1. Modelo metodológico

1.5 Estructura del documento

Esta memoria de investigación doctoral tiene la siguiente estructura:

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se presenta la conceptualización de la tesis. Se aborda la problemática que originó el trabajo, así como el contexto en el que surge, la motivación de la investigación, los objetivos y la metodología con la cual se espera alcanzarlos.

Capítulo 2: Marco de referencia

En este capítulo se presenta los conceptos fundamentales que soportan esta investigación. Adicionalmente, se muestra el análisis sistemático del estado del arte.

Capítulo 3: Escenarios de experimentación

Se describe y valida los escenarios de experimentación utilizados en esta investigación. Los escenarios de experimentación, para el estudio del servicio de LVS en redes LTE, están conformados por un escenario de emulación y un escenario real. En este capítulo presenta los detalles de su construcción y los resultados de la validación del escenario emulado a partir del escenario real mediante una herramienta estadística.

Capítulo 4: Caracterización del Tráfico del Servicio de Live Video Streaming

Este capítulo presenta la caracterización estadística del tráfico del servicio de *Live Video Streaming* - LVS sobre una red LTE emulada que utiliza la técnica de streaming adaptativo DASH. Se presenta toda la metodología utilizada para realizar el modelado y los resultados encontrados.

Capítulo 5: Medición de la Calidad de la Experiencia del servicio de LVS en redes LTE

Este capítulo presenta la metodología utilizada para realizar las estimaciones de QoE del servicio de LVS en redes LTE. Se comparan los resultados encontrados con un

caso de mediciones subjetiva realizado en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad del Quindío.

Capítulo 6: Análisis de capacidad del sistema LTE para el servicio LVS con métricas de QoE

El capítulo 6 presenta un análisis de las prestaciones del sistema LTE emulado para el servicio LVS a partir de la variación del número de usuarios, utilizado como referencia la norma del 3GPP para una red LTE, es decir, los parámetros de QoS. El análisis de los resultados obtenidos es realizado desde el enfoque de la QoE. Lo cual es un considerado como un aporte significativo, ya que permite contrastar el contexto de los parámetros de QoS con la experiencia real obtenida por el usuario final.

Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro

Este capítulo resume las conclusiones generales a las cuales se llegan con el desarrollo del presente trabajo. Igualmente se exponen las publicaciones y trabajos de grado derivados de la investigación, así como posibles trabajos futuros que pueden surgir a partir de esta tesis doctoral

Capítulo segundo

2. Marcos de referencia

2.1 Marco teórico

En esta sección se presentan los conceptos fundamentales relevantes en el desarrollo de la presente investigación, los cuales se encuentran enmarcados dentro de los ejes temáticos definidos en la revisión sistemática realizada para dar cumplimiento al objetivo planteado en esta tesis doctoral. Los ejes temáticos definidos son: servicio de streaming de video, evaluación de la calidad de video y modelado de tráfico. En este sentido, se consideran que los conceptos presentados son pilares para establecer la coherencia y consistencia del marco de referencia. Adicionalmente, se presenta el marco de antecedentes, en donde se presentan los trabajos previos realizados en las temáticas de estudio y que ayudan a dimensionar el aporte y relevancia de la presente tesis doctoral.

2.1.1 Tecnología Streaming

El *streaming* es la distribución digital de multimedia a través de una red de computadoras, de manera que el usuario consume el producto (generalmente archivo de video o audio) en paralelo mientras se descarga. La palabra *streaming* se refiere a una corriente continuada que fluye sin interrupción [21]. Entre los servicios de mayor crecimiento, y que son transmitidos usando técnicas de streaming a través de un proveedor de servicios de internet, se encuentra el *VoD*, el *LVS* y la Televisión IP (IPTV) [22]. Se define como *VoD* el servicio que permite a los usuarios acceder a múltiples contenidos en el momento exacto que lo desee, por otro lado, el servicio *LVS*

se define como un servicio que posibilita a los usuarios ver y subir videos sobre la red internet con transmisión en tiempo real en dispositivos como teléfonos inteligentes, cámaras, computadores, etc. [23]. Finalmente, el FG-IPTV (*Focus Group IPTV*) define a IPTV como un servicio multimedia que incluye televisión, video, audio, texto, gráficos y datos repartidos sobre una red gestionable basada en IP para proveer el nivel requerido de QoS, QoE, seguridad, interactividad y confiabilidad [24]. Entre los tipos de streaming utilizados para dar soporte a diferentes servicios se encuentran: tradicional, de descarga progresiva y adaptativo. Los diferentes tipos de streaming son definidos en el anexo A. Dentro de este contexto, existen diferentes técnicas de streaming adaptativos, dentro de las más populares se encuentran: *HTTP Smooth Streaming* – HSS [5], *HTTP Live Streaming* – HLS [6], *HTTP Dynamic Streaming* – HDS [7] y *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* – DASH [8]; la definición de las mencionadas técnicas se encuentran en el Anexo EA.

2.1.2 Calidad de la Experiencia - QoE

De acuerdo al grupo de estudio 12 de la ITU-T, la QoE se define como: “La aceptabilidad general de una aplicación o servicio, según lo percibe subjetivamente el usuario final”; adicionalmente, la ITU-T hace las siguientes aclaraciones: *i)* La calidad de la experiencia incluye los efectos completos del sistema de extremo a extremo (cliente, terminal, red, infraestructura de servicios, etc.). y *ii)* La aceptabilidad general puede estar influenciada por las expectativas y el contexto del usuario [25].

La QoE se basa en parámetros subjetivos, es decir, mide la interacción entre los contenidos presentados y la percepción del usuario (color, intensidad de la luz o el fracaso de algunos píxeles) y se expresa en palabras, tales como: excelente, buena, aceptable, regular o mala. De acuerdo a [21] existen otros factores que pueden influir en la QoE, los cuales se clasifican en rendimiento tecnológico, usabilidad, evaluación subjetiva, expectativas y el contexto; además se deben tener en cuenta otros factores como el tamaño de la pantalla, distancia de visualización, iluminación y el movimiento del usuario. Según el reporte técnico TR-126 [26], los métodos para estimar la QoE se clasifican en: subjetivo, objetivo e indirecto. Estos métodos son definidos en el anexo A

2.1.3 Indicadores de desempeño clave - KPI para QoE.

Son muchos los indicadores de desempeño o factores que afectan la estimación de la QoE. Una clasificación inicial de estos, según Moustakis en [27] se dividen en factores percentuales y técnicos, ver Figura 2.1.

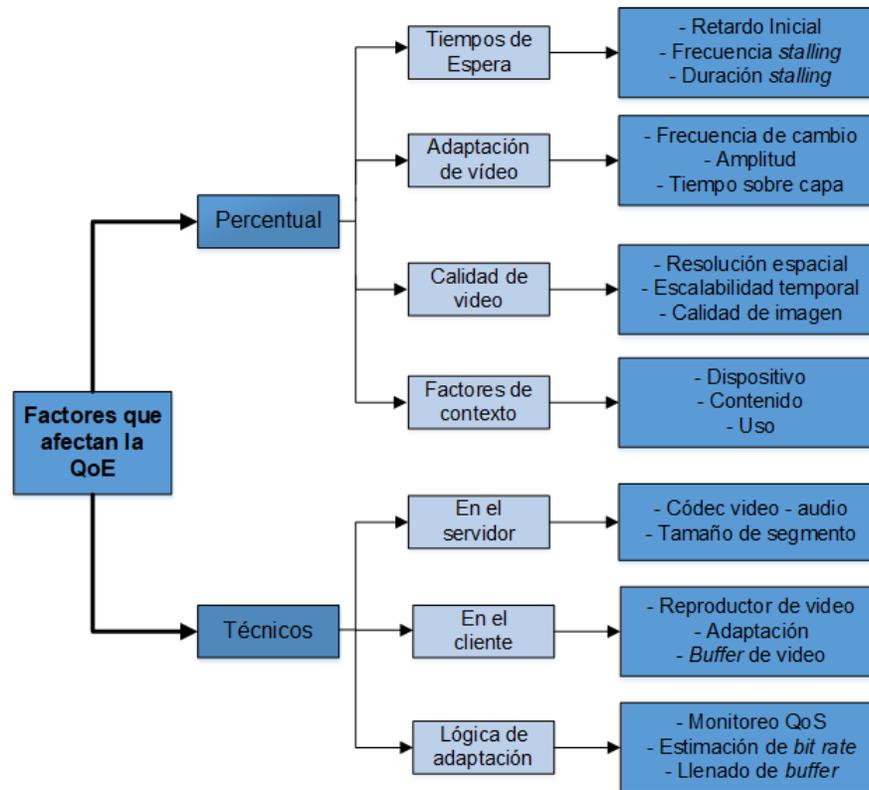


Figura 2.1. Factores que afectan la QoE [27]

A continuación, se definen los indicadores que son considerados como claves (*Key Performance Indicator* - KPI) según lo siguieren varias fuentes de investigación, entre ellas: [13], [19], [27], [28], [29], [30],[31] etc.

2.1.3.1 Retardo inicial

Se refiere al tiempo en segundos entre el inicio de la reproducción de video por parte del usuario y el inicio real de la reproducción. Se origina por el establecimiento de una conexión entre el usuario y el servidor, la transmisión de datos de información sobre la estructura de los medios y el almacenamiento en búfer y decodificación [19].

2.1.3.2 Eventos de bloqueo (Stalling)

Un evento de *stalling* es un estado que se presenta en la capa de presentación, cuando se suspende la reproducción del video. Esta condición generalmente sucede debido a eventos de *rebuffering* en el cliente. Un evento de *rebuffering* es una condición que ocurre en el búfer intermedio cuando su nivel se agota y es necesario volver a cargar nuevamente para contener una cantidad mínima de datos de video para reproducir. Por lo general, los eventos de *rebuffering* se indican al usuario, por ejemplo, en forma de una rueda giratoria, y su resultado es el estancamiento de la reproducción del video [19], [32].

2.1.3.3 Adaptación

Se refiere a un conjunto de distintos niveles de calidad de segmentos de multimedia que se utilizan para la transmisión adaptativa HTTP, entre los cuales el reproductor puede seleccionar para entregar al usuario de acuerdo a sus condiciones de red [19].

2.1.4 Métricas de QoE

Dependiendo del método para estimar la QoE, se han definido algunas métricas. Entre las más usuales se tienen: *Mean Opinion Score* – MOS, *Peak-Signal-to-Noise-Ratio* – PSNR, *Pseudo-Subjective Quality Assessment* – PSQA, *Structural Similarity Index* – SSIM, *Moving Pictures Quality Metric* - MQPM. De las anteriores, la MOS es la métrica de QoE más importante y de mayor uso. Ver definiciones en el anexo A.

2.1.5 Redes *Long Term Evolution* - LTE

El término LTE incluye el acceso de radio del sistema universal de telecomunicaciones móviles (*Universal Mobile Telecommunications System* - UMTS) a través de la UTRAN Evolucionada – E-UTRAN (*Evolved Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Terrestrial Radio Access*) introducida en 3GPP-R8, específicamente es el componente de acceso del *Evolved Packet System* - EPS. Dentro de los requisitos principales para la nueva red de acceso se tiene: alta eficiencia espectral, alta tasa de datos pico, corto tiempo de ida y vuelta, así como la flexibilidad en frecuencia y ancho de banda [33]. El EPS está basado exclusivamente en IP. Tanto los servicios en tiempo real como los servicios de comunicación de datos serán transportados por IP. La

dirección IP es asignada cuando el móvil se enciende y es liberada cuando se apaga. La Figura 2.2 presenta la arquitectura general de la red LTE y en el anexo A se presenta un resumen de la misma.

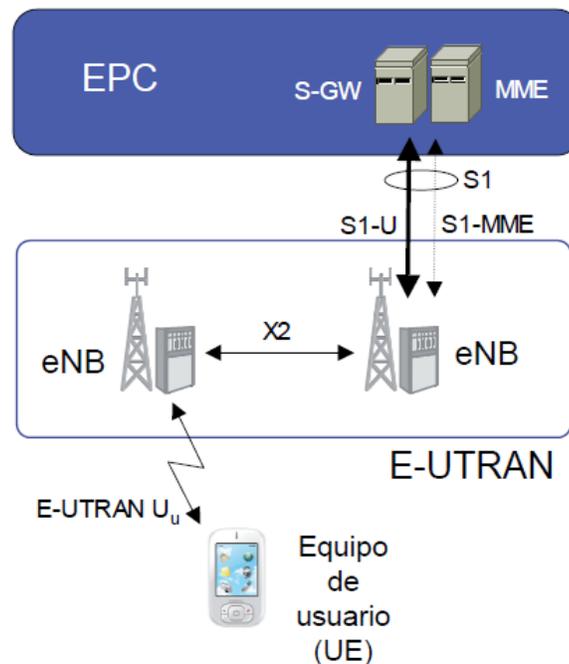


Figura 2.2. Arquitectura de la tecnología LTE [34]

2.1.6 Modelado de tráfico

Los modelos de tráfico son la base para cualquier evaluación del desempeño de las redes de telecomunicaciones, por lo tanto, deben ser precisos y capaces de captar las características estadísticas del tráfico real. La realización de un análisis de tráfico, proporciona herramientas que ayudan a determinar el impacto de la implementación de nuevos servicios y la previsión oportuna de situaciones no deseadas. Es por eso que los modelos o modelado de tráfico son esenciales para la evaluación de las prestaciones de una red de telecomunicaciones [16]. Además, permiten hacer pruebas en entornos controlados sin afectar el comportamiento de la red y de los usuarios [3]. Existen diferentes enfoques dados por [35], [36] para realizar un estudio de modelado de tráfico, entre los cuales se tienen: banco de pruebas, simulación, emulación y los modelos analíticos. En el anexo A se define cada uno de ellos.

2.2 Marco de antecedentes

Con el objetivo de determinar el marco de antecedentes se realiza un análisis sistemático, el cuál tiene como propósito integrar de forma objetiva y sistemática los resultados de los estudios empíricos sobre la temática que abarca el problema de investigación propuesto en esta tesis doctoral. Para realizar este análisis sistemático, se utilizan las metodologías propuesta por Kitchenham *et al* [37] y Biolchini *et al* [38]. En el anexo A se presenta un resumen del desarrollo de este análisis. De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis sistemático, la temática a trabajar se enfoca en tres ejes: Evaluación de la Calidad de Vídeo (Video Quality Assessment - VQA), Servicio de *Streaming* de Video y Modelos de tráfico; ver Figura 2.3. A continuación, se presentan los trabajos más relevantes en cada uno de los ejes temáticos presentados.

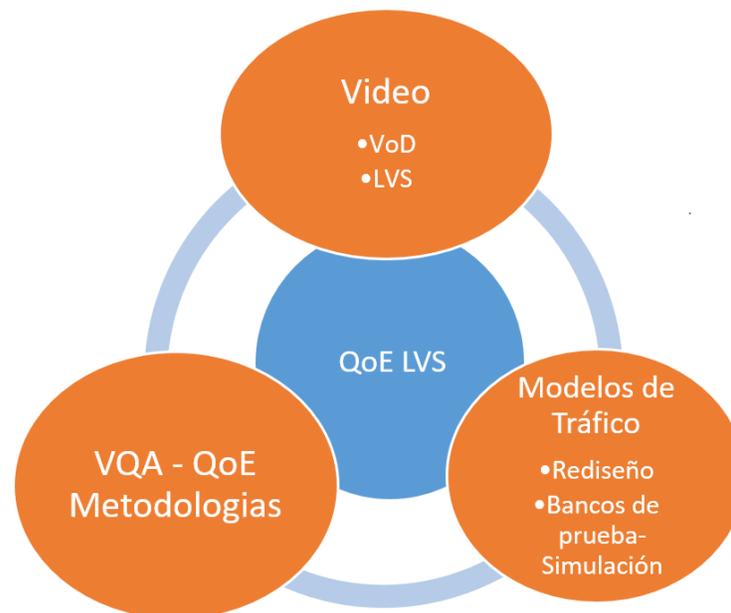


Figura 2.3. Ejes temáticos para la revisión sistemática

2.2.1 Evaluación de la calidad de video

Para las mediciones de calidad de vídeo, se pueden diferenciar dos contextos: uno desde la perspectiva de los componentes usados para procesar el video, que pueden

afectar potencialmente la calidad del mismo, tales como: la captura, el hardware de la pantalla, convertidores, multiplexores, códecs, enrutadores, conmutadores, etc.; y el segundo contexto, del lado de la percepción visual, que es aún más complejo, dado que si se va a medir la calidad de una manera significativa, se debe entender cómo las personas perciben el vídeo y su calidad. El primer contexto es el tradicionalmente llamado Medidas de Calidad Objetivas y el segundo Medidas de Calidad Subjetivas [23]. Con respecto a las medidas de calidad subjetivas, la Unión Internacional de las Telecomunicaciones ITU-T ha formalizado metodologías para su evaluación en varias recomendaciones [39],[40], donde se busca obtener la calificación promedio de todos los usuarios para un determinado vídeo, lo cual se conoce como *Mean Opinion Score* - MOS. La MOS se mide de acuerdo a la siguiente escala: 1-1.9 = malo (*bad*), 2-2.9 = pobre (*poor*), 3-3.9 = regular (*fair*), 4-4.9 = bueno (*good*) y 5 = excelente (*excellent*) [39]. Por otro lado, las métricas de calidad objetiva son algoritmos diseñados para caracterizar la calidad del video y predecir la MOS que los usuarios podrían obtener; dichas métricas no están basadas en encuestas a los usuarios del servicio; las recomendaciones ITU-T P.1201 [41], la ITU-T P.1202 [42] y la ITU-T P.1203 [19] proporciona una visión general de los modelos de algoritmos para la supervisión no invasiva de la calidad basados en IP con información del encabezamiento de paquete y en flujos de bits.

Debido a la riqueza y la complejidad inherente de los servicios basados en video, durante la última década se han dedicado muchos esfuerzos para desarrollar modelos apropiados de estimación de QoE [43]. Debido a las diferentes tecnologías y escenarios que pueden estar involucrados en este tipo de servicios, desarrollar un modelo general para hacer frente a esta heterogeneidad ha sido una tarea difícil; por lo tanto, las propuestas tanto de la academia como de los organismos de estandarización pretenden ser precisas para tecnologías específicas de codificación y transmisión en entornos particulares. Para limitar el alcance, esta revisión se enfoca en aquellos trabajos relacionados con la transmisión de servicios de video que emplean el protocolo de transporte confiable *Transmission Control Protocol* – TCP en redes celulares.

García-Pineda *et al*, presentan en [44] un modelo holístico para estimar y predecir la QoE subjetiva de manera integral. Para lo cual, analizan y miden diferentes variables relacionadas con la calidad del servicio, transmisión de bits y métricas básicas de calidad de video de transmisión de video en vivo a través de redes móviles LTE

Advanced (4G). Los autores aplican un método estadístico basado en el análisis factorial para evaluar la correlación de las variables, lo cual es utilizado para estimar la QoE (en términos de MOS) del video entregado siguiendo los enfoques de referencia completa y sin referencia. Los valores estimados de la MOS son validados mediante la estimación de la QoE de manera subjetiva (a través de encuestas). En el mismo contexto de los sistemas LTE, los autores de [45] y [46] presentan estudio sobre el impacto de diferentes parámetros de QoS sobre la estimación final de la QoE de servicios multimedia. En ambos casos, la atención se centra en los servicios de video en tiempo real distribuidos en una infraestructura LTE. En [45], Lentisco *et al* utiliza el nuevo método de evaluación de QoE, conocido como video *Mean Opinion Score* (vMOS) [12], el cual se encuentra en estudio en la Comisión de Estudio 12 (SG12) de la ITU-T, para la estimación de QoE en redes 3GPP usando DASH. La propuesta, conocida como transmisión *3GP-DASH* en *Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)* [13], se basa en la entrega de segmentos multimedia como archivos sobre el servicio de entrega de archivos de MBMS. Los autores concluyen que, al aplicar el modelo propuesto, es factible evaluar el impacto de algunos de los parámetros del servicio, por ejemplo, velocidad de bits de video, tiempo de almacenamiento en memoria intermedia inicial, etc., en la QoE estimada final. Por otra parte, los autores de [46], presenta una discusión sobre la interacción de los parámetros QoS/QoE en las futuras redes 5G y M2M. Los trabajos [44], [45] y [46] son de gran importancia en el desarrollo de esta tesis doctoral, ya que son un referente de comparación en la estimación de la QoE en escenarios 4G.

A su vez, el trabajo presentado en [47], los autores proponen un modelo de estimación de QoE para servicios de transmisión de video progresivo a través de redes de transmisión móvil. Específicamente, los autores presentan una metodología novedosa para estimar la QoE que toma en cuenta los eventos de *stalling* que sufre el receptor al visualizar la transmisión de video. Los resultados se validan al compararlos con las estimaciones obtenidas con los resultados extraídos de pruebas subjetivas. Los trabajos en [48–50] consideran la ocupación del búfer en el lado del cliente como un factor clave para seleccionar la velocidad de video más adecuada que se solicitará para los siguientes segmentos. Además, los autores de [50] presentan una propuesta para mejorar la QoE en transmisiones de video HTTP adaptativas en entornos celulares. Concretamente, los autores toman en consideración tanto las características del contenido de video como los recursos de radio disponibles para sobrescribir las

solicitudes HTTP del cliente en un proxy ubicado dentro de la red de distribución 4G. Por lo tanto, la velocidad de datos de los segmentos de video solicitados al proveedor de contenido se adapta de acuerdo con las condiciones de la red de acceso de radio (*Radio Access Network - RAN*). En [51], Masi *et al* presentan un método híbrido (cualitativo y cuantitativo) para modelar y predecir la QoE de las aplicaciones móviles utilizadas en redes WiFi o celulares 4G/LTE. Emplean 33 participantes, los cuales califican en laboratorio la QoE de aplicaciones móviles de uso frecuente y altamente interactivas, como: *Google Chrome, Google Maps, Spotify, Instagram, Facebook, Facebook Messenger y WhatsApp* en varios contextos durante cuatro semanas, obteniendo un total de 5663 clasificaciones de QoE. Adicionalmente, en la estimación objetiva, utilizan técnicas y algoritmos clásicos de aprendizaje automático (*Extreme Gradient Boosting*) para predecir el QoE del uso de la aplicación. Los autores demuestran a partir de los resultados del modelo se puede predecir la QoE del usuario con una precisión de 94 ± 0.77 . Ghadiyaram *et al* proponen en [28] un evaluador de QoE, llamado *QoE Indexer*, que tiene en cuenta las interacciones de los eventos de *stalling* en la medición de QoE. Las predicciones se realizan en tiempo continuo y los resultados obtenidos son aproximados a las mediciones subjetivas de QoE. Además, los mismos autores presentaron en [52] una base de datos de 174 videos afectados por distorsiones causadas por 26 patrones diferentes de eventos de estancamiento. Se presenta la metodología y los resultados de la evaluación subjetiva de QoE en 54 individuos.

Un aporte importante de los trabajos [47–52] a la presente investigación, es que definen y estudian los indicadores de desempeño claves en la estimación de QoE en redes móviles, los cuales se tienen en cuenta en esta tesis doctoral.

Los autores de [53] presentan una metodología basada en el aprendizaje automático para desarrollar una nueva métrica de calidad utilizando 9 algoritmos diferentes. Para obtener una alta precisión en sus predicciones, el modelo fue entrenado con un conjunto de datos compuesto por 960 secuencias de videos, generadas bajo una notable cantidad de condiciones que emulaban transmisiones realistas. En este contexto, los autores de [54] utilizan redes neuronales artificiales para desarrollar un modelo de estimación de QoE para el servicio de IPTV. Adicionalmente, en [55] se emplean diferentes modelos de QoE basados en diferentes técnicas de aprendizaje automático supervisado automático para predecir la QoE de los servicios multimedia típicos del usuario final como YouTube y Facebook. Como entradas para estos

modelos, los autores proponen utilizar parámetros pasivos de QoS extraídos de los terminales de los usuarios. En [56] los autores comparan tres técnicas para estimar la MOS, entre las técnicas comparadas se tienen las redes neuronales artificiales (ANN), Análisis de factores (FA) y regresión lineal multinomial, a diferentes escalas de tiempo y con enfoques referencia completa y sin referencia. Se presenta una evaluación de rendimiento de estas técnicas, donde concluyen que el comportamiento de la estimación MOS basada en FA es más preciso, a menos que se tenga un escenario sin pérdidas en donde ANN se desempeña mejor. La calidad subjetiva del video ha sido evaluada a través de encuestas. Finalmente, los autores evalúan la precisión de la MOS estimada frente a algoritmos de calidad de video bien conocidos disponibles públicamente siguiendo las recomendaciones dadas por *Video Quality Experts Group (VQEG)*. Los trabajos [53–56] presentan diferentes técnicas de aprendizaje automático para estimar la MOS, adicionalmente para validar los resultados evalúan la QoE con encuestas. En el presente trabajo se estima la QoE con la Rec. ITU-T P.1203 que utiliza la técnica de aprendizaje de *Radom Forest*, y siguiendo la metodología de validación, los resultados se comparan con un estudio subjetivo basado en encuestas para un caso de uso muy específico.

Los trabajos anteriores tienen como enfoque principal la estimación de la QoE, propuesta en su gran mayoría por los autores. Algunos de los trabajos son validados a partir de estimaciones subjetivas de QoE. Adicionalmente, se aclara que, en ningún caso, estas metodologías propuestas para la estimación de la QoE se encuentran estandarizadas.

Desde el punto de vista de la estimación subjetiva de la QoE, Socola *et al* en [57] describen la metodología empleada para evaluar la QoE subjetiva de vídeo del servicio de *YouTube Live* en un dispositivo móvil. La metodología presentada en [57], es utilizada en el desarrollo del presente trabajo doctoral en la estimación de la QoE subjetiva para el servicio de LVS en una red LTE emulada.

Por otro lado, dentro del desarrollo de la revisión sistemática de este eje temático, se presentan a continuación los trabajos encontrados que abordan la estimación paramétrica objetiva de QoE para servicios de transmisión de video a través del protocolo TCP, el cual es el protocolo de la capa de transporte utilizado en redes móviles inalámbricas y que se encuentra definido por 3GPP para redes LTE.

En [58] los autores presentan un modelo de estimación de calidad de video, en donde se propone una predicción de calidad integral para sesiones largas de multimedia para *HTTP Adaptive Streaming (HAS)*. El modelo propuesto, está disponible para cuatro modos de operación, diferentes niveles de información de flujo de bits relacionados con el medio y tipos de codificación del flujo multimedia. Este modelo fue elegido por el ITU-T para implementar el módulo de estimación de calidad de video Pv, denominado ITU-T Rec. P.1203.1 [29]. Robitza *et al* en [59] describen el modelo de calidad para *HTTP Adaptive Streaming-DASH*. Es conveniente aclarar que los trabajos [58] y [59] fueron sometidos a la competencia UIT-T P.NATS y partes de ellos se han publicado en la recomendación oficial ITU-T P.1203 [19].

Robitza *et al.* presentan en [60] un conjunto de datos y una implementación pública de la Rec. ITU-T. P.1203. Además, se muestra el rendimiento obtenido por el modelo aplicado en comparación con las pruebas subjetivas. Los autores concluyen que se obtienen mejoras significativas al usar algoritmos de estimación de QoE de video basados en flujo de bits en lugar de aquellos basados en una simple inspección de metadatos. También se destaca la solidez lograda al combinar modelos clásicos con enfoques novedosos basados en el aprendizaje automático para estimar con precisión la QoE del usuario. Sin embargo, la implementación presentada no explicita la metodología empleada para obtener el tiempo de almacenamiento previo inicial (*Initial buffer*), ni el número de eventos de bloqueo (*stalling*) ocurridos durante la reproducción del video.

En [61] los autores analizan el rendimiento de la predicción de la calidad de los modelos paramétricos P.1203 recientemente estandarizados, en un escenario de transmisión real en servicios *Over-The-Top (OTT)* (*YouTube, Vimeo, amazon Instant Video* y un *framework* de streaming propietario basado en *DASH*). En particular, se utiliza una base de datos de validación que comprende trazas de flujo de bits de los servicios antes mencionados para evaluar el rendimiento de los modelos P.1203 (modo 0 y modo 1). Como conclusión, los autores proponen que esta recomendación podría mejorarse aún más utilizando modelos de video de referencia completa de corto plazo (FR).

Gómez *et al.* presenta en [30] un banco de pruebas inalámbrico móvil LTE para la experimentación de transmisión multimedia. El diseño del banco de pruebas se basa en software de radio, donde la arquitectura de red LTE típica (EPC y eNodeB) es proporcionada por una solución comercial, para este caso, el LTE100 de Amarisoft

[62]. Los experimentos del estudio de caso se centran en eventos de congestión de tráfico para evaluar el QoE alcanzado en condiciones adversas de la red. Los autores analizaron, en un sistema LTE, cómo la congestión del ancho de banda del enlace descendente afecta dos métricas de QoE (el tiempo promedio que un usuario espera para comenzar a ver el video y el número promedio de re-almacenamientos intermedios). En los trabajos [61] y [30] los autores no proporcionan ninguna información sobre la metodología implementada para la aplicación del estándar P.1203.

Finalmente, los autores de [13] afirman, con respecto al modelo ITU-T P.1203, que su definición compleja no propicia una identificación directa de algunos supuestos introducidos en la recomendación, como es el caso del impacto de algunos *KPIs* de QoE, tales como, *initial delay, stalling, and adaptation of the visual quality* sobre la puntuación general de QoE. Para superar este problema, los autores investigan el impacto de los factores QoE en la puntuación de salida del modelo.

De los trabajos presentados, y que son implementados a partir de la Rec. ITU-T P.1203, se observa que no se evidencia una metodología clara para la implementación de la norma. En comparación con el estado de la técnica, en este trabajo doctoral, se presenta en el capítulo 5 una descripción detallada del desarrollo, implementación y aplicación de la Rec. UIT-T. P.1203. Se proporciona una descripción y discusión del modelo y se valida la implementación desarrollada con pruebas subjetivas y con la implementación presentada en [60]. El objetivo, en esta parte, es proporcionar un trabajo fundamental y práctico para el diseño y desarrollo de una herramienta de estimación de QoE para servicios de video basados en la nueva Rec. UIT-T. P-1203. Adicionalmente, se presenta en esta investigación un análisis del impacto generado por los *KPI* de QoE, estudiados en este trabajo, en la estimación general de la QoE para el servicio de LVS en una red LTE emulada.

2.2.2 Servicios de Video Streaming

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, el proveedor del servicio debe realiza algunas tareas de gestión sobre la red, como el monitoreo y control del ancho de banda, retardo, *jitter*, *throughput* y pérdida

de paquetes que le permitan garantizar un adecuado nivel de calidad para sus usuarios. Las mencionadas tareas son mucho más complejas en un ambiente inalámbrico en donde aparecen otras dificultades tales como: cobertura de la señal inalámbrica, alta tasa de pérdidas de paquetes y la inestabilidad del canal inalámbrico; lo anterior, producido por fenómenos propios del canal tal como multitrayectos, desvanecimientos, interferencia, ruido, etc. [21], [63], [64]; los cuales pueden afectar considerablemente el desempeño de las redes móviles inalámbricas y por ende disminuir la evaluación de QoE [65].

Los servicios de video han sufrido una gran transformación en los últimos tiempos con respecto a los protocolos y técnicas empleados para su transporte. En las primeras versiones de los servicios de entrega de video, el protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) se empleó como protocolo de transporte debido a su simplicidad y la cantidad reducida de tráfico de control. Posteriormente, con la mejora de las redes de datos, se adoptó el protocolo confiable TCP y, hoy en día, la mayoría de los servicios de video más populares en Internet, por ejemplo, VoD o LVS utiliza técnicas de transporte adaptativo sobre el Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) [52]. Estas técnicas adaptan la velocidad de transmisión de datos de video al ancho de banda disponible en la red, por lo tanto, eligen sobre la marcha la configuración de codificación de video más adecuada dadas las condiciones del usuario final y del camino de datos [66]. Entre las técnicas de adaptación de video más populares, se pueden considerar (i) *HTTP Smooth Streaming (HSS)* de Microsoft [5], (ii) *HTTP2 Live Streaming (HLS)* de Apple [6], (iii) *HTTP Dynamic Streaming de Adobe (HDS)* [7], y, finalmente (iv) *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)*, propuesto por *Moving Picture Expert Group (MPEG)*, y que se definió como un estándar ISO / IEC (23009-1: 2012) [8].

Con respecto a la utilización de técnicas de *streaming* de vídeo en redes móviles inalámbricas, desde sus inicios la tecnología LTE ha ido progresivamente incorporando mejoras en respuesta al aumento de tráfico de las redes móviles, en busca de aumentar la experiencia de video a sus usuarios finales [67]. Las bases y especificaciones de LTE se consignan en el documento *3GPP Release-8* a finales del año 2008 [68]. Posteriormente el subgrupo *3GPP SA4* trabajó en códecs y protocolos, e inicia con la actividad en *streaming HTTP* en abril de 2009 y se completa la *Release-9* a principios de marzo 2010 [69]; el *streaming* adaptativo *HTTP (ASH)* sobre *3GPP* integra el modo transparente al servicio de *streaming* conmutado de paquetes (*PSS*)

de extremo a extremo en 3GPP. Las especificaciones técnicas 3GPP TS 26.234 v12.5.0 *Release 12* [70], definida como *LTE Advanced* en diciembre de 2014 y 3GPP TS 26.247 *Release 13* [71]; especifican el *Streaming Adaptativo Dinámico sobre HTTP (3GPP-DASH)* como el mecanismo adoptado por 3GPP en sus redes LTE. Las mejoras anteriores soportan características como: rápido arranque inicial y búsqueda, eficiencia en ancho de banda, conmutación de tasa de bit adaptativa, adaptación a las propiedades de *Content Delivery Network -CDN*, reutilización de servidores *HTTP* y caches, reutilización de motores de reproducción de medios existentes, soporte para entrega de servicios bajo demanda, en vivo y desplazados en tiempo y simplicidad para una amplia adopción. A partir de 3GPP *Release 15* [72], se introduce el primer conjunto completo de estándares 5G y se proyectan los primeros desafíos para la presentación de 3GPP hacia *IMT-2020*. El 3GPP *Release 15* incluye mejoras en *LTE* e, implícitamente, el *Evolved Packet Core (EPC)*. A medida que el trabajo de la versión 15 ha madurado y se acerca a su finalización, el enfoque del grupo ahora está pasando a la primera etapa de la versión 16 [73], conocida informalmente como “5G Fase 2”. Actualmente se encuentran en desarrollo 83 estudios relacionados con la versión 16 más otros trece relacionados con *Rel-17* [74]: los cuales cubren temas tan diversos como el servicio de prioridad multimedia, servicios de capa de aplicación vehículo a todo (V2X), acceso satelital 5G, soporte de red de área local en 5G, convergencia inalámbrica y por cable para 5G, posicionamiento y ubicación de terminales, comunicaciones en dominios verticales y automatización de redes y nuevas técnicas de radio. Se iniciaron o avanzaron más estudios sobre seguridad, códecs y servicios de transmisión, interfuncionamiento de LAN, corte de red y IoT. De lo anterior, se evidencia que en la actualidad, aún se encuentra vigente el uso de la técnica de *streaming* adaptativo *DASH* adoptado en [71].

A continuación, se resaltan los trabajos más relevantes encontrados dentro de este eje temático, los cuales se enfocan principalmente al uso de técnicas de *Streaming* adaptativo y la estimación de la QoE.

En [11] los autores estudian el efecto de varios parámetros de QoS sobre la estimación de la QoE, para lo cual presentan la evaluación de tres protocolos de *streaming* de video MPEG-DASH, RTSP, RTMP (*Real Time Messaging Protocol*) para los servicios de VoD y LVS sobre tecnologías 4G y WiFi. En los experimentos realizados para la evaluación se utiliza el analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz CMW500 y teléfonos inteligentes. Como contribuciones importantes del

trabajo se encuentran el estudio de desempeño comparativo de protocolos de *streaming* de video adaptativos y no adaptativos bajo escenarios reales de redes en términos de QoE y la evaluación comparativa de dos modelos paramétricos para evaluar la QoE según la recomendación ITU-T R.1201. Todos los resultados son obtenidos de campañas de mediciones en un escenario de prueba real, lo cual hace imposible variar parámetros de redes que pueden ser determinantes en la evaluación de la QoE. Lo anterior será un factor clave en el desarrollo de la presente propuesta doctoral, ya que, al utilizar un entorno de emulación, se tiene la posibilidad de variar y encontrar parámetros determinantes en la evaluación de la QoE. El anterior trabajo es de gran importancia, ya que es un referente que podría ser utilizado para contrastar y validar los resultados encontrados en la presente propuesta.

Los autores de [75] analizan el rendimiento de diferentes protocolos de transporte de transmisión de video adaptativos, a saber, DASH, HLS, HSS y HDS en diferentes escenarios simulados. La desventaja presentada por este trabajo, es que los autores para la construcción de los escenarios de experimentación utilizan una empresa proveedora de servicios de CDN, lo cual dificulta manipular los parámetros de configuración inicial de los servicios utilizados. En este trabajo, el emulador Net.Storm WAN [76] se utiliza para introducir impedimentos controlados. El estudio comparativo se enfoca en la evaluación del rendimiento de diferentes reproductores de video según la técnica de transmisión empleada.

En [77], se realiza una evaluación de las arquitecturas de redes utilizadas por empresas comerciales, se estudian las técnicas de *streaming* adaptativo (DASH, HLS, HSS y HDS) y se diseña un caso de estudio para una red de *streaming* de video para aplicaciones de telemedicina entre los hospitales de tres pequeñas ciudades costeras y el Hospital de la Seguridad Social de la ciudad de Guayaquil en el Ecuador. Este estudio sirve como referente para la evaluación de las diferentes técnicas de Streaming realizadas en esta tesis doctoral.

En [78], los autores ofrecen una visión general del estado del arte de las técnicas de *streaming* adaptativo sobre HTTP a través de dominios multimedia y distintas redes. Se muestran resultados obtenidos para analizar los desafíos y soluciones en algoritmos de transmisión adaptativa, mejora de QoE, protocolos de red, almacenamiento en búfer, etc. También los autores se centran en varios desafíos sobre los factores de influencia de QoE en una condición variable de red, que a menudo se ignoran en las metodologías de *streaming* adaptativo actuales. Este trabajo

sirve para el desarrollo de esta tesis doctoral, ya que presenta los desafíos e inconvenientes presentados por las técnicas de streaming adaptativo, las cuales se analizan en la prestación de servicio de LVS una red LTE emulada.

Los autores de [79] presentan un banco de pruebas de *CDN* donde se utilizan tecnologías de transmisión adaptativa HTTP. Los resultados de la evaluación se calculan en función de parámetros de *QoS* (*bandwidth, delay and packet loss*), obteniendo el desempeño del uso de técnicas de *streaming* adaptativo con *CDN*. Como principal conclusión, los autores demuestran que el uso de este tipo de tecnologías adaptativas mejora el rendimiento de la carga del servidor y la congestión de la red; lo cual proporciona una mejor experiencia para los usuarios finales. Sin embargo, los autores no especifican el tipo de tecnología de *streaming* utilizada.

Los autores de [80] proponen un banco de pruebas virtual para la implementación de experimentos de *streaming* adaptativo de video. Los autores estudiaron diferentes parámetros que afectan el rendimiento de *QoE*, entre las cuales se tienen: el retraso inicial (retraso de inicio al comienzo de la reproducción de un video), cambios en la codificación del video, los *frequency switches* (el número de veces que se cambia la calidad), el tiempo de video acumulado (el número y la duración de los eventos de paradas de video - *stallings*), el uso de la CPU y el consumo de energía de la batería. Además, los autores encuentran una relación de estos parámetros con una estimación subjetiva de *QoE*. Para estimar la *QoE*, los videos originales y recibidos en el banco de pruebas virtual son evaluados por usuarios expertos.

Como aporte a los trabajos revisados en esta sección, en la presente investigación doctoral, en la sección 5.2.4.2 se presenta una comparación de las técnicas de *streaming* adaptativo más empleadas por los usuarios finales. Este estudio se enfoca en resultados de la estimación de la *QoE*, la cual es obtenida con la aplicación de la metodología propuesta por estándar UIT-T P.1203. Las comparaciones se realizan para el servicio de LVS en una red LTE emulada, a la cual se le varían de forma controlada algunos *KPIs* de *QoS*.

2.2.3 Modelado de Tráfico

En el tercer eje temático: “Modelos de tráfico”; como se menciona en el planteamiento del problema, los modelos de tráfico son esenciales para la evaluación de las

prestaciones de una red de telecomunicaciones, además de posibilitar la realización de pruebas en entornos controlados sin afectar el comportamiento de la red y de los usuarios [16], [17]; de esa forma se podrá a partir del modelo de tráfico construir escenarios de prueba que caractericen el comportamiento de un número elevado de usuarios de un determinado servicio. En este tipo de escenario es posible validar el rendimiento de los servicios en diferentes entornos [16].

En la presente propuesta, el modelado de tráfico gira entorno a un ambiente de emulación, ver Figura 2.1, en donde se busca integrar herramientas de simulación con servidores reales para el servicio de LVS. A continuación, se presentan los trabajos más relevantes encontrados en el análisis sistemático dentro de esta temática, resaltando los aportes y debilidades relacionadas con el desarrollo de la siguiente propuesta.

En [81] se presenta una aproximación a un modelo de tráfico analítico del servicio de *streaming* de vídeo adaptativo HTTP; el cual corresponde al primer modelo analítico reportado en la literatura para el mencionado servicio. El modelo propuesto se conforma de tres componentes: un modelo del servidor de vídeo, un modelo para la red IP entre el cliente y el servidor y un modelo de cliente para reproducción de vídeo. El presente trabajo parte del supuesto de simular todo el sistema como un modelo de colas anidadas para obtener el modelo analítico, además se asume que el tráfico de paquetes presenta una distribución binomial; por otro lado, en el modelamiento de la red, se asume una red de área amplia- WAN que conecta un servidor de vídeo con un cliente y los demás elementos del sistema. En el presente trabajo doctoral se busca encontrar el modelo de tráfico a partir de un entorno de emulación en donde se disminuyen muchas de las suposiciones dadas en las simulaciones. El trabajo presentado en [81] será un referente para comparar y validar los resultados obtenido en la presente propuesta doctoral. Adicionalmente en [81] se presenta una propuesta para mejorar uno de los problemas que afectan el servicio de *streaming* de vídeo, específicamente la adaptación de tasa de vídeo, lo cual podría presentar mejoras en la evaluación de QoE del servicio, esta iniciativa de propuesta será tenida en cuenta durante el desarrollo de la presente propuesta doctoral.

En el estudio presentado en [82], Campo *et al.* presentan una caracterización de tráfico para un servicio de VoD en una red IPTV. Se utiliza para facilitar el estudio, un analizador léxico diseñado para esta actividad, el cual extrae la información de cada uno de las componentes *GOP (Group Of Picture)* del VoD como son los *frames I, P* y

B, además del audio; de los videos codificados a través de los estándares de IPTV, y un estándar patentado basado en el protocolo de mensajería en tiempo real (RTMP). Una de las contribuciones presentadas en este trabajo, es la posibilidad que los investigadores puedan realizar análisis de tráfico en detalle sin depender de herramientas de pago, supuestas funciones de densidad de probabilidad (PDF) para servicios, ni trazas de tráfico de videos de prueba o videos cargados en internet por otros centros de investigación; en otras palabras, con la herramienta léxica desarrollada es posible realizar estudios del comportamiento del tráfico con base en funciones de distribuciones obtenidas de manera real. Se resalta de este trabajo el nivel de granularidad que presenta, ya que se encontraron pocos trabajos dentro de la revisión sistemática que partiera de las componentes del *GOP* para construir el modelado de tráfico de un servicio de telecomunicaciones. En el desarrollo de la presente investigación doctoral, se toma como base la metodología presentada por los autores en [82] para realizar el proceso de caracterización del tráfico del servicio de LVS en una red LTE emulada.

Continuando con esta línea de trabajos, el autor de [16] estudia, analiza y modela el tráfico generado por los servicios interactivos de una Comunidad Académica Virtual - CAV, con contenidos de audio y video de alta calidad propios del entorno IPTV; donde el principal servicio es el de VoD soportado en tecnología IPTV. El trabajo presentado en [16] se toma como punto de partida de la presente investigación doctoral, para lo cual se extiende el campo de aplicación a otro tipo de redes y codificaciones. En [83] los autores presentan un modelo de tráfico para un servicio multimedia y su evaluación utilizando técnicas de emulación. El tráfico generado por dispositivos reales, para un servicio de video chat, se inyecta en una red virtual creada a través del módulo de software *SITL (System In The Loop)* de *OPNET Modeler*. Se realiza la caracterización del tráfico para el servicio planteado, de donde se obtiene el modelo estadístico que describe el comportamiento y permite su simulación. Los resultados muestran las previsiones a tener en cuenta de acuerdo con el consumo de recursos en el uso de este tipo de técnicas de emulación y el análisis del comportamiento del modelo. Los autores no presentaron información sobre la configuración de la herramienta de emulación utilizada ni la parametrización del entorno de propagación utilizado (modelos de propagación).

En [3] se exploran algunos aspectos del modelamiento de *streaming* de IPTV y se presentan estudios generales de generadores de trazas de video sintético,

adicionalmente se concluye que es importante estudiar los parámetros de IPTV antes de implementar el servicio con el fin de evaluar alternativas de arquitecturas de red para configurar la red para un mejor rendimiento. La generación de vídeo de tráfico sintético se considera como una debilidad de este trabajo, es por eso que en la presente investigación doctoral se trabaja con un servidor real de streaming de video en vivo, sin necesidad de recurrir a generadores de tráfico sintético; adicionalmente en [84] se estudia y caracteriza el tráfico de VoD para el mismo tipo de redes IPTV, en donde se plantea un problema de optimización y presenta su solución a través de un modelo sub-óptimo. En [85] se presentan las técnicas para modelar y predecir el tráfico de video en forma estadística, lo cual será de gran utilidad en el desarrollo del presente trabajo. En este trabajo los autores se enfocan solamente al modelado del tráfico de datos con series de tiempo ARIMA, específicamente con el modelo SARIMA. Los autores argumentan que es la forma más precisa para describir el tráfico IPTV.

Los trabajos correspondientes al eje temático modelado de tráfico, hasta aquí presentados, en su gran mayoría se centran en la caracterización del tráfico sobre redes IPTV y con técnicas de *streaming* de descarga progresiva. El trabajo doctoral presentado, se diferencia de los anteriores en que éste se enfoca en redes móviles inalámbricas que utilizan tecnología LTE; además esta tecnología utiliza la técnica de *streaming* adaptativo avalada por 3GPP, la cual es conocida como DASH.

Con respecto a los bancos de prueba utilizados para realizar pruebas de rendimiento y caracterizar tráfico, los cuales son considerados dentro de este eje temático, se describe a continuación los trabajos encontrados en la revisión sistemática y que se consideran relevantes para esta investigación.

En [14] Abdurrahman *et al.* presentan una plataforma de simulación basada en NS-3. Esta herramienta fue desarrollada para evaluar y optimizar el rendimiento de las redes LTE en tiempo real. La plataforma es compatible con protocolos de comunicación de única ruta como UDP/RTP y bidireccionales tales como HTTP y DASH. Se utiliza en la etapa de simulación el modelo de propagación de espacio libre de *Friss*. Este modelo de propagación presenta limitaciones notables para simular con precisión las condiciones de propagación de escenarios complejos, como los que presentan obstáculos o propagación por trayectos múltiples. El trabajo presentado en [15] muestra cómo se puede enviar tráfico en tiempo real a través de una red LTE emulada con NS3. Este estudio se centra en la comparación de los resultados obtenidos tanto en entornos de simulación como de emulación; sin embargo, este trabajo no presenta

información sobre la configuración del modelo de propagación utilizado en las emulaciones. Los trabajos [14] y [15] son de gran importancia para el desarrollo de la presente investigación, ya que es la base para la construcción de escenario de emulación presentado en este trabajo.

Por otra parte, mediante el uso de *Universal Software Radio Peripheral* (USRP), que es un dispositivo que puede actuar como un terminal de radiofrecuencia final y puede ajustarse usando *GNU Radio* [86], se evidencia el desarrollo de algunas aplicaciones en redes LTE. Como ejemplo, se puede encontrar una solución patentada desarrollada por *Fabrice Bellard* en [87], la cual es una solución propietaria comercializada por Amarisoft [62]; Además, está limitado por el rango de *RF* del *USRP* utilizado y no está integrado con ningún simulador de red. En [88], se evalúa el rendimiento de diferentes métricas de QoS para la transmisión de tráfico de video en una red LTE simulada con OPNET.

En [89], los autores presentan un simulador LTE abierto para transmisión de video móvil; se analiza el rendimiento de la simulación de una red LTE en tiempo real enfocándose en métricas de QoS. En [90] los autores presentan un banco de pruebas inalámbrico móvil LTE para la experimentación de la QoE de transmisión multimedia; pero no es una herramienta de código abierto y además no describe la configuración del escenario de simulación utilizado. Aunque estos últimos trabajos [88–90] presentan resultados interesantes, no se describe la configuración del sistema ni los parámetros utilizados, como es el caso del modelo de propagación empleado, además no se evidencia la validación de los resultados obtenidos con mediciones reales. El esfuerzo más significativo para desarrollar un simulador 4G de alta precisión se realiza en [91], el cual aún sigue en etapa de desarrollo. En particular, se presenta el módulo *LTE-EPC Network Simulator (LENA)* para NS-3. Este módulo es un simulador de red de código abierto orientado al producto *LTE/EPC* que facilita a los investigadores y pequeños desarrolladores diseñar y probar algoritmos y soluciones. Sin embargo, todavía faltan estudios que garanticen su validez en comparación con la experimentación real. Por esa razón, en este trabajo doctoral se utiliza y valida esta herramienta, comparando exhaustivamente los resultados encontrados con los obtenidos de una implementación real de 4G.

En [30] los autores presentan un banco de pruebas experimental para obtener la QoE de un servicio de transmisión multimedia en redes inalámbricas móviles LTE. Sin

embargo, la herramienta presentada no es de libre acceso, no describe el escenario de simulación utilizado ni se validan los resultados con mediciones reales. En [92], la herramienta *Network Emulator (NetEm)* se utiliza para desarrollar un banco de pruebas para la evaluación de la QoE de un servicio de transmisión 3D a través de redes LTE para el protocolo RTP. Para este estudio, se utilizan métricas clave de rendimiento de QoS, además se utiliza el modelo de propagación de *Hata* para caracterizar las condiciones de transmisión inalámbrica. Los autores no presentan validaciones con sistemas reales.

Los autores de [93] presentan la evaluación del rendimiento en la transmisión de video en redes LTE utilizando parámetros de QoS (*end-to-end delay, jitter, throughput and Signal-to-Noise Ratio (SNR)*); la evaluación se realiza para determinar el impacto de la interferencia cocanal y los beneficios del *MBMS* (Servicio multimedia de transmisión multimedia LTE-A) sobre el LTE tradicional. Todo el sistema se implementa utilizando el simulador *OPNET*. En el estudio presentado, los autores no proporcionaron detalles de la parametrización del sistema de simulación, ni realizan comparaciones de los resultados con sistemas reales.

En [94], Jiménez *et al* presentan un novedoso modelo analítico para estimar la QoE para el servicio cifrado de *YouTube Live* a partir de datos de nivel de paquete recopilados en las interfaces de una red inalámbrica. Las entradas al modelo son métricas TCP / IP, de las cuales se obtienen cuatro indicadores clave de rendimiento del servicio (*S-KPIs*): tiempo para reproducción del video, duración de interrupción de video, frecuencia de interrupción de video y calidad de imagen. El modelo es desarrollado con una plataforma experimental que consiste en un servidor de transmisión en vivo, un agente terminal, una red de acceso de radio, un emulador de nivel de red, un software de sonda y un proxy *man-in-the-middle*. La evaluación del modelo se lleva a cabo por comparar las estimaciones de *S-KPI* con mediciones del agente terminal en diferentes condiciones de red introducidas por el emulador de red. En este trabajo no se presenta información sobre la configuración del emulador de red ni la parametrización del entorno de prueba.

En [95], Ciambone *et al* estudian el impacto de la tasa de pérdida de paquetes (*PLR*) y el retardo de extremo a extremo (*end-to-end delay- E2E delay*) sobre la estimación de la QoE en condiciones de red LTE reales para varios servicios: Voz sobre IP y *streaming* de video. Para realizar el estudio, presentan la implementación de un marco de simulación construido sobre *SimuLTE/OMNeT++*. Los autores demuestran que

existe una compensación clara entre el *PLR* y el *E2E delay* que debe tenerse en cuenta para mantener niveles aceptables de QoE. El escenario de experimentación presentado en este trabajo es totalmente simulado. Dentro de este mismo contexto, Park *et al* en [96] proponen una metodología para evaluar los límites superiores del volumen de tráfico y el uso de bloques de recursos, en una sola celda LTE, que permita garantizar la transmisión continua de video en entornos urbanos densos, en otras palabras una determinada QoE del servicio, sin comprometer la QoS; el estudio estadístico se basa en mediciones en el campo en tiempo real de sistemas LTE en vivo en Seúl, Corea del Sur. Para el desarrollo de la presente investigación doctoral, se tiene en cuenta estos dos últimos estudios y se analiza el efecto, de los parámetros de QoS mencionados, en la estimación de la QoE para el servicio LVS sobre una red LTE emulada.

En los estudios previamente revisados, referente a los bancos de prueba utilizados para ejecutar pruebas de rendimiento y caracterizar tráfico, tanto a nivel de simulación o en entornos de emulación, se evidencia la falta de información sobre los parámetros de configuración de los entornos de experimentación presentados, específicamente los modelos de propagación utilizados. Adicionalmente, en la gran mayoría no se presenta la respectiva validación o comparación de los resultados obtenidos con entornos reales. Por esta razón, en este trabajo doctoral, en la sección 3.1 se presenta un escenario de emulación, que tiene en cuenta condiciones reales y en donde se describen y validan la parametrización de los modelos de propagación utilizados, tanto en escenarios interiores como exteriores, además se validan los resultados obtenidos con los resultados que se obtienen en un entorno real construido para tal propósito.

De acuerdo al análisis realizado de los trabajos que conforman el estado del arte, y que se encuentran enmarcados en los tres ejes temáticos que abarcan la presente propuesta doctoral, se resaltan los siguientes aspectos:

- Se evidencia que existen metodologías para la estimación de la QoE, tanto objetiva como subjetiva. Para el caso de la estimación objetiva, la metodología P.1203 avalada por la ITU-T, no define específicamente cómo debe ser implementada, lo cual se ha convertido en un inconveniente para su aplicación. Esto motiva a que, en este trabajo doctoral, se presente y valide en el capítulo 5 una descripción detallada del desarrollo de una herramienta empleada en la

estimación objetiva de la QoE para el servicio de LVS en una red LTE a partir de la Rec. ITU-T P.1203. Adicionalmente, se presenta en la sección 5.2, un estudio del impacto de los KPI definidos para QoE y su relación con algunas KPI de QoS.

- Ante la poca información encontrada sobre disponibilidad y falta de detalles en la parametrización de escenarios de experimentación que utilicen elementos reales, en este trabajo doctoral, se construye un escenario de emulación, es decir un banco de pruebas, que tiene en cuenta condiciones reales y en donde se describen y validan parámetros de configuración, tales como los modelos de propagación, tanto en escenarios interiores como exteriores. Además, se validan los resultados obtenidos con los resultados que se obtienen de un escenario de experimentación real construido para soportar el servicio de LVS en una red LTE real. Adicionalmente, el banco de pruebas servirá para realizar estudios como caracterización de tráfico, estudios de desempeño, capacidad, etc., para el servicio de LVS en una red LTE con un alto grado de confiabilidad.
- Con respecto a los modelos de tráfico y su importancia en la evaluación de las prestaciones de una red de telecomunicaciones, no se evidencia la existencia de un modelo de tráfico que describa el comportamiento estadístico de las componentes que conforman el GOP de video y audio para un servicio de LVS en una red LTE. Por lo anterior, en esta tesis doctoral se utiliza el escenario de experimentación construido para encontrar el modelo de tráfico que permita caracterizar el comportamiento estadístico del servicio de LVS en una red LTE emulada, con un nivel de granularidad tal que involucra las componentes del GOP de video y audio.
- Respecto al servicio de videostreaming y a las diferentes técnicas de streaming adaptativo, no se evidencian estudios, bajo parámetros de QoE, que relacionen el desempeño del uso de estas técnicas, específicamente para el servicio de video en vivo en redes inalámbricas 4G. Es por esto, que en este trabajo doctoral se realiza una comparación del desempeño de las diferentes técnicas de streaming adaptativo utilizadas en la prestación de un servicio de LVS para una red LTE a partir de parámetros de QoE.

Capítulo tercero

3. Escenarios de experimentación

De acuerdo a los hallazgos analizados en el marco de antecedentes en la sección 2.2, acerca de la poca información encontrada sobre disponibilidad y falta de detalles en la parametrización de escenarios de experimentación que hacen uso de elementos reales; se presenta a continuación, los detalles referentes a la elaboración de los escenarios de experimentación utilizados en esta investigación.

Para realizar los diferentes estudios del servicio de LVS en redes LTE, y que permitan alcanzar los objetivos propuestos en esta tesis doctoral, se construyó un escenario de experimentación, el cual se conforma de un escenario de emulación y un escenario real¹. El escenario de emulación, y siguiendo los lineamientos de parte de las comunidades académica, científica y empresas en el uso y desarrollo de plataformas de prueba de sistemas de comunicaciones que consideren condiciones de funcionamiento reales, se encuentra conformado por elementos reales: servidor de video y cliente, los cuales intercambian información a través de un elemento simulado, en este caso una red LTE. Por otro lado, para la construcción del segundo escenario de experimentación, se implementa un escenario real del sistema, para el cual, a diferencia del escenario emulado, no utiliza simuladores para la red LTE, en este caso se utiliza el analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500. El objetivo de la creación de los dos escenarios, fue la de poder configurar y validar el escenario de emulación a partir del escenario real, utilizando principalmente métricas de QoS. Una vez validado el escenario de emulación, se

¹ Escenarios desarrollados en el marco de la pasantía de investigación realizada en la Universidad Politécnica de Cartagena - UPCT (España), bajo la dirección de la Dra. María Dolores Cano B.

extrapolaron los resultados a diferentes ambientes que permitan generalizar los resultados obtenidos.

Para la integración y puesta a punto de los escenarios de experimentación, se realizó la interconexión de diferentes elementos. En primer lugar, se realiza la tarea de implementar y configurar el servidor de video, el cual se utilizó en los dos escenarios de trabajo; posteriormente el servidor de video implementado se interconectó con el sistema de comunicación inalámbrica LTE. Para el caso del escenario emulado, se utilizó el simulador de redes NS3, versión 26 sobre Linux Ubuntu 14.04 LTS y la librería LENA para dar soporte a la tecnología LTE [97]. En el caso del sistema real se utilizó el analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500. Finalmente, para consumir el video, se empleó un cliente de video, el cual se aloja en un computador portátil.

3.1 Escenario de Emulación

Para la construcción del escenario de emulación se utiliza la configuración propuesta en [14], el cual fue adaptada y validada en [98],[99]. El escenario de emulación está conformado por un servidor real de video, una red LTE (simulada con NS3) y un cliente (*User Equipment*, UE). Éste escenario se compone de 3 PCs, cuyas características se pueden observar en la Tabla 3.1. En la Figura 3.1 se puede observar el esquema general del sistema de emulación y el esquema de interconexiones.

PC	Características	Sistema Operativo	Software
PC -1	Intel Core 2 a 2.13 GHz, con 4 GB de RAM	Linux Ubuntu 14.04 LTS	NS3.26
PC -2 Servidor	Intel Core i7-3612QM CPU 2.1GHz, 8 GB de RAM	Windows 7 Professional	<i>Wowza Streaming Engine</i> [100] Wireshark [101]
PC -3 Cliente	Intel Core 2 Duo CPU 2.1GHzx2, 4 GB de RAM	Windows 7 Professional o Linux Ubuntu	VLC Akamai Adaptive Media Player [102] Aplicación desarrollada Wireshark [101]

Tabla 3.1. Característica de los PC utilizados en el sistema de emulación

En el PC1 se aloja la red LTE simulada con la librería LENA sobre NS3. Esta red LTE está compuesta de un host remoto, un nodo SGW/PGW (*Serving Gateway/ Packet Data Network Gateway*), una estación base eNB (*evolved NodeB*) y un nodo de usuario final (*user equipment, UE*) que adquiere el rol de dispositivo móvil. Así, al nodo UE llega tráfico real de video que es inyectado al sistema mediante el servidor real wowza de LVS (PC2) a través de la red LTE simulada. Dada la imposibilidad de reproducir el video dentro del sistema simulado, se utiliza el PC3 para la reproducción y monitorización de la información recibida por el nodo virtualizado UE. Para posibilitar la comunicación entre PC2-Host-Remoto y UE-PC3, se utiliza la plataforma HIL (*Hardware in the Loop*) que permite tomar al PC1 como una caja negra con componentes virtualizados que recibe y entrega datos a los sistemas reales extremos, PC2 y PC3.

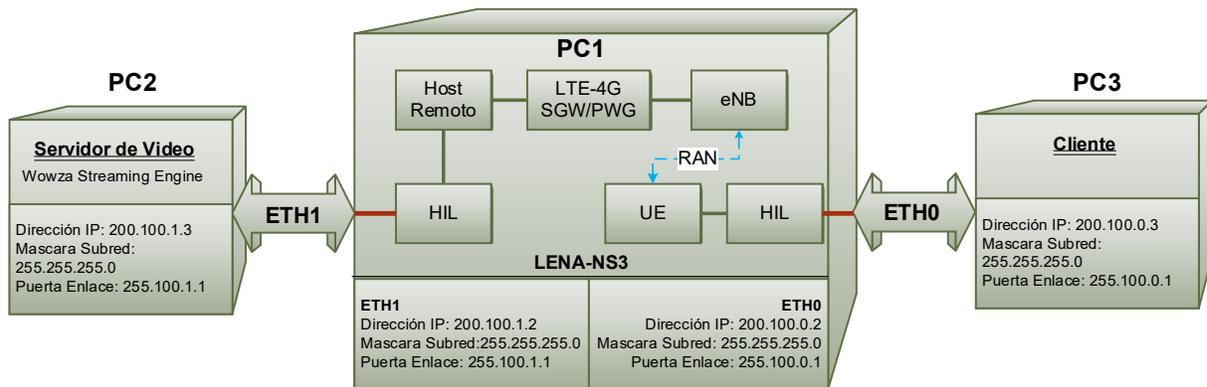


Figura 3.1. Esquema general del escenario de Emulación

Para lograr la interconexión entre la red LTE desplegada en NS3-LENA y el servidor wowza y entre la misma red LTE y el UE externo fue necesario realizar modificaciones al código NS3-LENA, en cuanto al direccionamiento del PC3 y la clasificación del tipo de tráfico. Para el direccionamiento, la tabla de enrutamiento de NS3-LENA conoce la ruta hasta el nodo UE. Sin embargo, no enruta más allá de este punto, por lo que es necesario asignar un número IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) al PC3 y asegurarse que la información que sea enviada al UE pueda alcanzar PC3 para que se pueda reproducir el video, monitorizar la información recibida y evaluar las prestaciones. Esta modificación se realiza en el archivo *ipv4-list-routing.cc* dentro de NS3-LENA. En cuanto al tipo de tráfico, el problema radica en que NS3 no soporta tráfico de paquetes reales. La modificación consiste en que el tráfico de video *streaming* no sea descartado y se le permita continuar dentro de la red. La modificación

se realiza en el archivo *epc-sgw-pgw-application.cc*. Las dos modificaciones mencionadas se muestran en el anexo B.1.2.

La configuración del servidor del vídeo en el PC2 se realiza con el software *Wowza Streaming Engine*. El servidor wowza es compatible con las tecnologías de *streaming* adaptativo DASH, HLS, HDS y HSS. Para ello, utiliza archivos del Lenguaje de Integración Multimedia Sincronizado (*SMIL*) que admite el uso de flujos de varias velocidades de bits en grupos para la transmisión de *bitrate* adaptable HTTP.

Para reproducir el video por parte del cliente en el PC3, fue necesario desarrollar un reproductor que brindara la posibilidad de trabajar con técnicas de *streaming* adaptativo y que fuese compatible con el servidor de video utilizado, para este caso el *Wowza Streaming Engine*. Para su configuración y dependiendo del protocolo de *streaming* utilizado (RTMP, RTSP, DASH, HLS, HDS, HSS) se emplea el reproductor de vídeo apropiado; VLC para descarga progresiva (RTMP y RTSP) y para protocolos adaptativos (DASH, HLS, HDS, HSS) se utiliza el Akamai Adaptive Media Player (AMP) [102] y una aplicación de reproducción de video basada en web desarrollada con HTTP Apache [103] a partir del Wowza Player. La configuración del servidor del vídeo, los *scripts* desarrollados para la implementación de LTE sobre NS3 y el reproductor se muestran en el Anexo B.

La Figura 3.2 muestra la implementación del escenario emulado, para lo cual la primera actividad realizada es la interconexión con el servidor de vídeo *wowza*, el cual se encuentra en el PC2; este se realiza a través de *Ethernet1* mediante el respectivo direccionamiento *IP*. La conexión con el cliente de vídeo, el cual se aloja en el PC3, se realiza a través de *Ethernet0*.



Figura 3.2. Implementación del escenario emulado en los laboratorios de la UPCT

3.1.1 Reproductor de *streaming* adaptativo

En la construcción del reproductor de vídeo, en el lado del cliente, se parte de los reproductores propuestos por *Wowza Streaming Engine*. En el anexo 0 se presenta los diferentes códigos en *html* adaptados de *Wowza Streaming Engine*. Para la reproducción, se configura un servidor de *http* apache en el cliente para cada una de las diferentes técnicas de *streaming* adaptativo. Es necesario usar el archivo *SMIL*, utilizado por el servidor de vídeo *wowza*, para reproducir el flujo de ancho de banda más alto que admita la conexión cliente- servidor. El reproductor del cliente determina qué transmisión reproducir, según las condiciones de la red. La sintaxis de la URL depende del tipo de reproductor a utilizar. Para las diferentes técnicas de *streaming* se utiliza las siguientes sintaxis:

- MPEG- DASH
http://200.100.1.3:1935/envivo/smil:myStream.smil/manifest.mpd
- Dispositivos iOS Apple (HLS):
http://200.100.1.3:1935/envivo/smil:myStream.smil/playlist.m3u8
- Adobe Flash Player (San Jose/Adobe HDS)
http:// 200.100.1.3:1935/envivo/smil:myStream.smil/manifest.f4m
- Microsoft Silverlight (Smooth Streaming - HSS)
http:// 200.100.1.3:1935/envivo/smil:myStream.smil/Manifest

Adicionalmente, se crear una función que permita visualizar los cambios de resolución en el reproductor de DASH, ya que en el reproductor propuesto por *wowza* no se encuentra habilitada esta opción. En el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.3 se muestra el funcionamiento general del reproductor, adaptado del reproductor de *wowza* en este trabajo doctoral, y que presenta la posibilidad de observar los cambios de resolución para la técnica de *streaming* adaptativo DASH.

La Figura 3.4 muestra el reproductor de *streaming* para DASH, en la parte baja del diagrama, se aprecian el módulo de cambios de resolución en una línea de tiempo desarrollado en este trabajo doctoral. El siguiente link, presenta un vídeo en el cual se puede apreciar una sesión, en la cual un UE se aleja de la eNB a una velocidad de 3 m/s (10,8 Km/h) y consume dos tipos de vídeo, se aprecia la estimación del ancho de banda del enlace y los cambios de resolución en la reproducción.

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_Dash/video_final_concambiosde_resoluci%c3%b3n.mp4

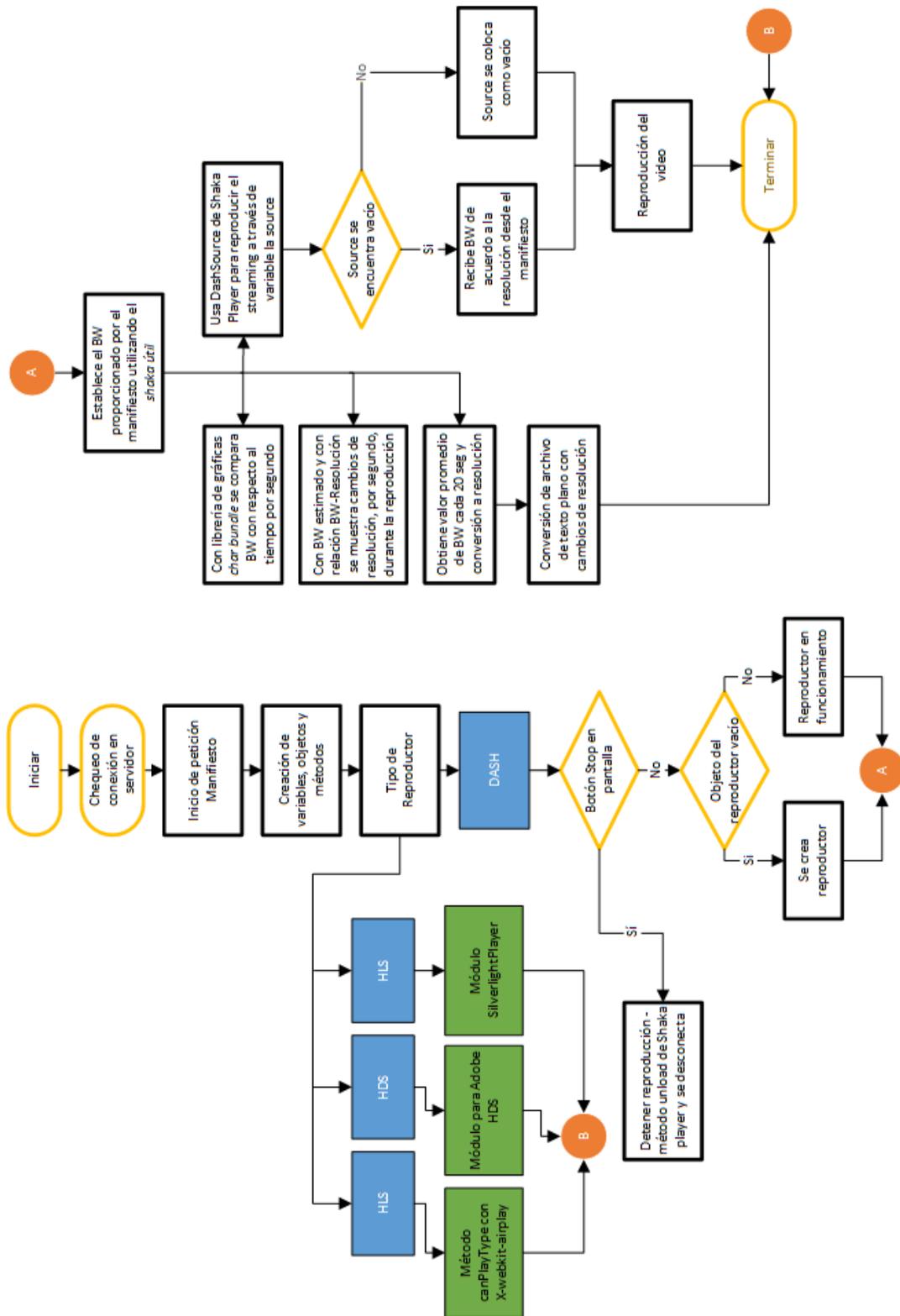


Figura 3.3. Diagrama de flujo de reproductor de streaming adaptativo

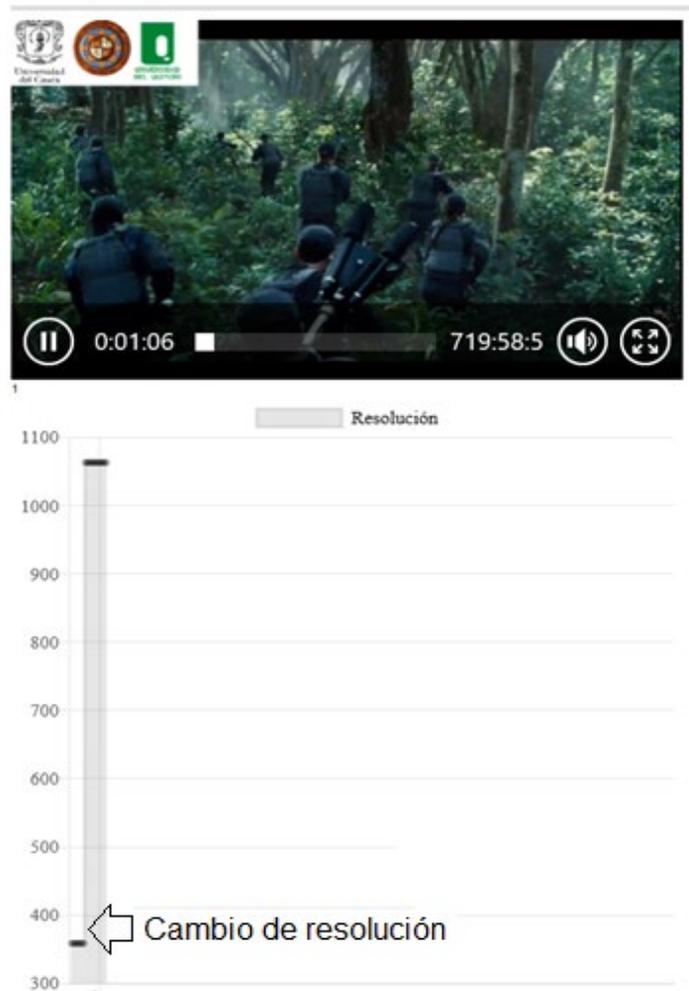


Figura 3.4. Reproductor de streaming para DASH

En el siguiente link se puede apreciar un video donde se muestra el escenario de emulación elaborado:

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_Dash/Emulador_.mp4

3.2 Escenario real

En la construcción del escenario real, se utiliza el analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500 (Ver Figura 3.5). El R&S CMW500 es un instrumento de medida, capaz de realizar la función de un generador de radiofrecuencia, un analizador de radiofrecuencia y una estación base, a través de

un sólo equipo. Éste soporta estándares de telefonía móvil tan comunes como son GSM y WCDMA y LTE (incluye MIMO). Además, permite realizar sofisticadas tareas de medición inalámbrica durante la ejecución de una aplicación, lo que posibilita ajustar parámetros como la atenuación externa durante el transcurso de la prueba, y con ello mejorar el índice de potencia recibida en el dispositivo móvil. Tiene un sistema operativo Windows XP integrado que simplifica el manejo del sistema, del cual se puede ejecutar el software de aplicación del instrumento, que incorpora una interfaz gráfica para manipular el instrumento y seleccionar las funciones a realizar y ser configurado de acuerdo al modo de operación.



Figura 3.5. Analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500

En la construcción del escenario real, se utiliza el R&S CMW500 como estación base. Con esta configuración, se establece un canal radio entre los extremos de una comunicación, de manera que se puedan intercambiar mensajes de control y obtener información relativa al dispositivo móvil, como su capacidad, y también al enlace radio. Además, esta aplicación incorpora una interfaz para configurar todos los parámetros que intervienen en la comunicación. Cuando el R&S CMW500 actúa como estación base, lo que hace es transmitir una señal en el enlace descendente para que el dispositivo móvil pueda sincronizarse a la red y establecer un enlace directo [104].

Para la configuración del servicio de LVS, es necesario que el R&S CMW500 utilice la DAU (Data Application Unit). Esta unidad permite el intercambio de paquetes de datos entre un UE y un destino final que se encuentra en una red local externa, para este caso el servidor de video wowza. Para lo cual, el servidor de video wowza debe ser conectado al CMW500 mediante Ethernet a través de la interfaz “LAN DAU”, la cual se encuentra ubicada en la parte posterior. El paso a seguir es realizar la comunicación

inalámbrica LTE, entre el CMW500 y el UE. En el anexo A, se explica la configuración del CMW500 para utilizar la DAU y la red LTE.

Para el proceso de validación del escenario emulado mediante el escenario real, con el objeto de tener mayor exactitud, se configuran para el escenario real dos ambientes de trabajo, un ambiente en interiores (*indoor*) y otro en exteriores (*outdoor*).

3.2.1 Escenario real: ambiente para interiores

El esquema general del escenario real en un ambiente de interiores se muestra en la Figura 3.6. La Figura 3.7 muestra una fotografía de la implementación realizada². Como se observa en esta figura, para la implementación se utiliza el PC2 y el PC3 descritos en la sección 3.1, el analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500 en modo de estación base, dos antenas EM-6116 (Ver especificaciones en el anexo AB.2), el cliente de vídeo (PC3) se conecta a través de la interfaz radio con un modem 4G ZTE MF823 al CMW500 a una distancia de 1 m. La habitación en donde se realiza el montaje, es construida en hormigón con una dimensión de 3mx4mx3m.

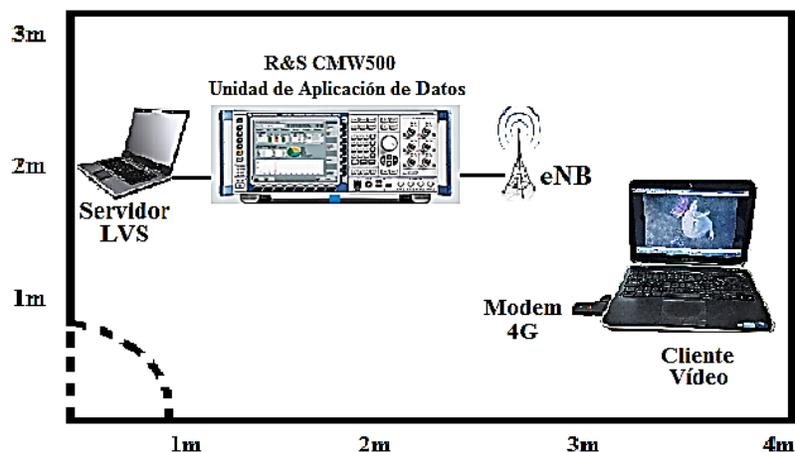


Figura 3.6. Esquema del escenario real para ambientes de interiores

² Implementación realizada en los laboratorios de telemática de la Universidad Politécnica de Cartagena – UPCT



Figura 3.7. Implementación en el laboratorio de la UPCT del escenario real para ambientes de interiores

3.2.2 Escenario real: ambiente para exteriores

El esquema general del escenario real en un ambiente de exteriores se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La implementación del presente escenario se muestra en la Figura 3.9³, ver. Como se observa en esta figura, para la implementación se utiliza el PC2 y el PC3 descritos en la sección 3.1, el analizador de comunicaciones CMW500 en modo de estación base, dos antenas 14 IP-G14-F2425-HV (Ver especificaciones en el anexo AB.2), el cliente de vídeo (PC3) se conecta a través de la interfaz radio con un modem 4G ZTE MF823 al CMW500 a una distancia fija de 50 m.

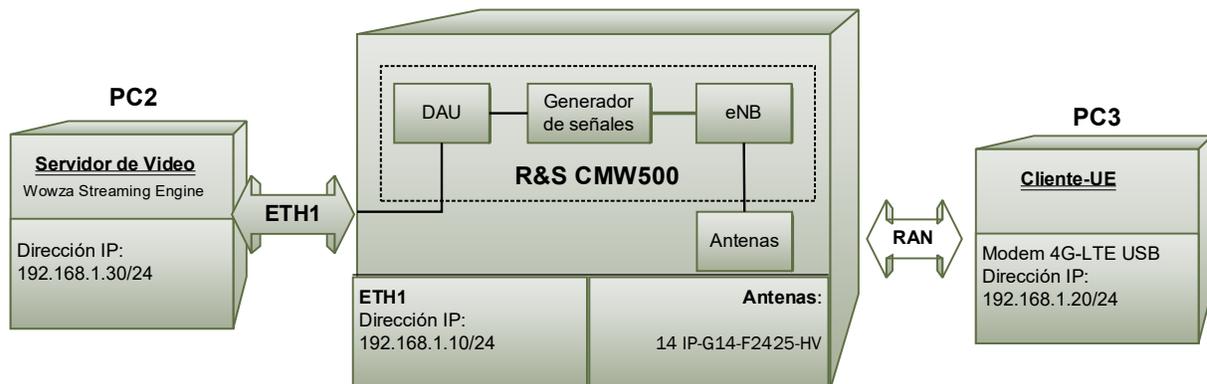


Figura 3.8. Esquema del escenario real para ambientes de exteriores

³ Implementación realizada en los patios del campus muralla del mar de la UPCT



Figura 3.9. Implementación en patios del campus muralla del mar de la UPCT del escenario real para ambientes de exteriores

3.3 Validación de los escenarios de experimentación

El proceso de validación de los escenarios de experimentación tiene como objetivo determinar los parámetros de configuración apropiados que deben ser utilizados en el escenario de emulación para obtener un comportamiento equivalente al escenario real. Para realizar la validación, se comparan métricas de QoS en ambos escenarios de experimentación (emulado y real); en este caso las métricas seleccionadas son *throughput*, *jitter*, porcentaje de pérdida de paquetes y retardo promedio entre paquetes.

Entre los parámetros de configuración utilizados en ambos escenarios, el parámetro más sensible que debe ser considerado en el escenario emulado es el modelo de propagación, en cualquiera de los dos ambientes emulados implementados (interior o exterior). Para la selección del modelo de propagación del escenario de emulación, y de acuerdo a la zona de cobertura en donde se ubica el sistema real, se observa en las mediciones realizadas que el escenario real presenta cambios drásticos entre la amplitud y la fase de la señal a pequeños cambios o movimientos de fracciones de longitud de onda entre el receptor y el transmisor, los cuales son descritos estadísticamente mediante un método estocástico. Los modelos que tienen en cuenta las anteriores condiciones son los “*Small-Scale Fading*”, entre los cuales se encuentran: las distribuciones de *Rice* y *Rayleigh*, los modelos *Log-Normal Fading*, *Suzuki*, *Weibull* y *Nakagami*. Esta última es la expresión más general, ya que se puede

ajustar a otras funciones, por ejemplo, Rayleigh o Log-Normal, ajustando correctamente el factor m [105]. Este modelo de propagación se ha utilizado ampliamente en la literatura relacionada, tal como se expone en [106] y [107], lo que demuestra su pertinencia para estimar las condiciones de propagación en escenarios interiores y exteriores con la presencia de desvanecimiento. Por lo anterior, en este trabajo, el modelo *Nagakami-m* es utilizado como uno de los modelos de propagación a validar. Además, de acuerdo al análisis de la literatura la utilización de modelos de propagación en escenarios de emulación, tales como: *HybridBuildings* y *JakeProcess*, también se validarán dentro de las pruebas realizadas en esta actividad [108]. El modelo *HybridBuildings* es un modelo que resulta de la integración de diferentes modelos y es capaz de evaluar pérdidas de trayecto en un rango de frecuencia entre 200 a 2600 MHz, en diferentes entornos y con edificaciones (interiores y exteriores). Este modelo incluye el modelo Hata, COST231, ITU-R P.1411 (comunicaciones de corto alcance) y ITU-R P.1238 (comunicaciones interiores). Al combinar los anteriores, es posible evaluar en detalle la trayectoria en diferentes escenarios tales como: ambientes urbanos, suburbanos y abiertos, enlaces de corto y largo alcance, impacto de la posición del nodo respecto a edificios (interior, exterior e híbrido), pérdida por la penetración en edificios, etc. El modelo de propagación de *JakeProcess* emplea ganancia de trayectoria, fase inicial y frecuencia Doppler aleatorias para todas las sinusoides individuales. El modelo de propagación *JakeProcess* se describe en [108].

Los resultados obtenidos con los diferentes modelos de propagación en interiores y exteriores, y que son soportados por NS3, son contrastados con el escenario real mediante el estadístico de análisis de la varianza unifactorial-ANOVA [109]. La cual es una técnica estadística que indica si dos variables (una independiente y otra dependiente) están relacionadas en función de si las medias de la variable dependiente son diferentes en las categorías o grupos de la variable independiente. Es decir, indica si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes. Aplicado la validación mencionada, se determinará si los resultados obtenidos en el escenario emulado de LTE son similares a los obtenidos en el escenario real de LTE real en términos de métricas de QoS. Por lo tanto, se realizan varios experimentos en el escenario emulado usando los modelos seleccionados. Los resultados obtenidos se compararán mediante ANOVA con los resultados obtenidos en el escenario de experimentación real, en los dos entornos: interiores y exteriores. Al aplicar ANOVA de una vía, se calcula una estadística de prueba llamada F . Si el estadístico de prueba

F es mayor que el valor crítico F_C , se debe rechazar la hipótesis nula planteada de medias de población iguales y concluir que hay una diferencia (estadísticamente) significativa entre la población. Para el presente trabajo significaría que los resultados obtenidos en ambos escenarios (real y emulado) no son comparables. Por el contrario, si F es menor que F_C , entonces se debe aceptar la hipótesis nula, lo que significa que los resultados emulados se validan con respecto a un entorno real. Además, si el valor p para el estadístico de prueba F es menor que α ($\alpha = 0.05$), entonces el estadístico de prueba F se considera significativo a ese nivel. Los estudios validación de ANOVA de una vía se realizan para dos entornos, uno en interiores, con los protocolos RTMP y RTSP y otro en exteriores para los protocolos RTMP y DASH.

Para el estudio en ambos escenarios de prueba, se usó como elemento de test 100 segundos de transmisión en vivo del vídeo “*Big Buck Bunny*” [110], este tiempo es suficiente para observar el comportamiento de los parámetros a comparar. Empleando esta fuente de vídeo, se implementa un servicio de LVS típico, para lo cual se utilizan los protocolos RTMP, RTSP y DASH. Los anteriores protocolos son ampliamente utilizados en la transmisión de contenido audiovisual a través de Internet [111]. En la capa de transporte estos protocolos emplean el protocolo TCP y/o el protocolo UDP. En este caso en particular, se utiliza el protocolo confiable TCP para RTMP y DASH y el protocolo no confiable UDP para RTSP. Así, el vídeo en sus diferentes configuraciones fue consumido en tiempo real por un usuario conectado de forma inalámbrica a una red LTE, tanto en el escenario real como emulado. Cada experimento se repite 10 veces para cada configuración seleccionada. De esta forma, a partir de los resultados obtenidos se calcula sus valores medios e intervalos de confianza ($\alpha=0,05$) para cada configuración, evitando así posibles desviaciones debido a valores atípicos puntuales.

3.3.1 Validación de los escenarios de experimentación en interiores

En la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se muestran los parámetros de configuración y ajustes iniciales para cada uno de los escenarios de experimentación en interiores.

Parámetro	Descripción	
	Escenario de Emulación	Escenario Real
Potencia operación eNB	50 dBm	RSRP 46 (-94 to -93 dBm)

Configuración Capa Física	OFDMA, FDD, Banda 7, Frec. DL= 2644 MHz, Frec. UL=2535, BW cell UL=DL=10 MHz, Nro RB: DL=UL=50. Mod. QPSK	
Tipo de Antena	coseno, Altura 1.5 m	EM-6116 Omnidireccional
Modelo de Propagación	<i>Nakagami</i> ($m= 0.5,1;3;5$), <i>HybridBuildings</i> y <i>JakeProcess</i> Altura 1.5 m	
Potencia Operación UE	26 dBm, Altura 1.5 m, distancia 1m	Altura 1.5 m, distancia 1 m
Figura de ruido eNB	2 dB	
Figura de ruido UE	7 dB	
Modo de Transmisión	SISO	

Tabla 3.2. Configuración de escenarios de experimentación en interiores

Parámetro	Descripción
Codificación de Vídeo	
Codificador	H.264/MPEG-4 AVC: Baseline Profile (BP)
Resolución (px)	240p (426x240); 360p (640x360); 480p (854x480); 720p (1280x720); 1080p (1920x1080).
Tasa de codificación de bits (Kbps)	528 para 240p; 878 para 360p; 1128 para 480p; 2628 para 720p; 4628 para 1080p
Frames por segundos	30
Codificación de Audio	
Codificador	AAC
Canales	Estéreo
Tasa de bits (Kbps)	96 para 240p; 128 para 360p, 480p; 192 para 720p, 1080p
Frecuencia de muestreo	44.100 kHz

Tabla 3.3. Ajustes de codificación en interiores

A continuación, para los dos escenarios, se presentan los resultados obtenidos para diferentes métricas de QoS en la prestación del servicio LVS usando el protocolo RTMP (Figura 3.10 y Figura 3.11) y el protocolo RTSP (Figura 3.12 y Figura 3.13).

De las métricas de QoS obtenidas en el escenario de emulación, usando el protocolo RTMP (Figura 3.10 y Figura 3.11) se aprecia como el modelo de *Nakagami* con $m=1$ presenta la mayor similitud con respecto a los valores medidos en el escenario real. Un efecto interesante observado es el aumento del *jitter* en los escenarios emulados debido al aumento de la resolución de las muestras, lo cual es analizado en [112]; en consecuencia, se produce una disminución absoluta del *throughput*, aunque, de forma relativa, los resultados entre ambos escenarios concuerdan. La forma de las gráficas, obtenidas en el servidor, para la métrica de *interpacket delay* a diferentes resoluciones,

muestran una gran similitud entre las mediciones obtenidas en el entorno real y en el entorno de emulación con el modelo *Nakagami* con $m=1$, ver Figura 3.10. El resto de modelos y ajustes del modelo *Nakagami*- m no son capaces de aproximarse a la tendencia obtenida en el escenario real. En el caso del *throughput*, las mediciones realizadas conservan una forma muy similar entre los diferentes modelos de propagación; nuevamente, las mediciones de emulación que utiliza el modelo de propagación *Nakagami* con $m=1$, es la que mejor se ajusta al escenario real. En el extremo del cliente, ver Figura 3.11, se puede observar que, en los escenarios de emulación, altos valores de la métrica de *interpacket delay* impactan de una manera negativa el *throughput*, especialmente para bajas y altas resoluciones, lo cual evidencia una mejor respuesta del emulador para resoluciones de 480p y 720p. En cuanto a la métrica de pérdida de paquetes, se observa en la Figura 3.11, una mejor respuesta del sistema de emulación, para resoluciones de 360p y 480p, cuando se modela el sistema con el modelo de propagación *Nakagami* con $m=1$.

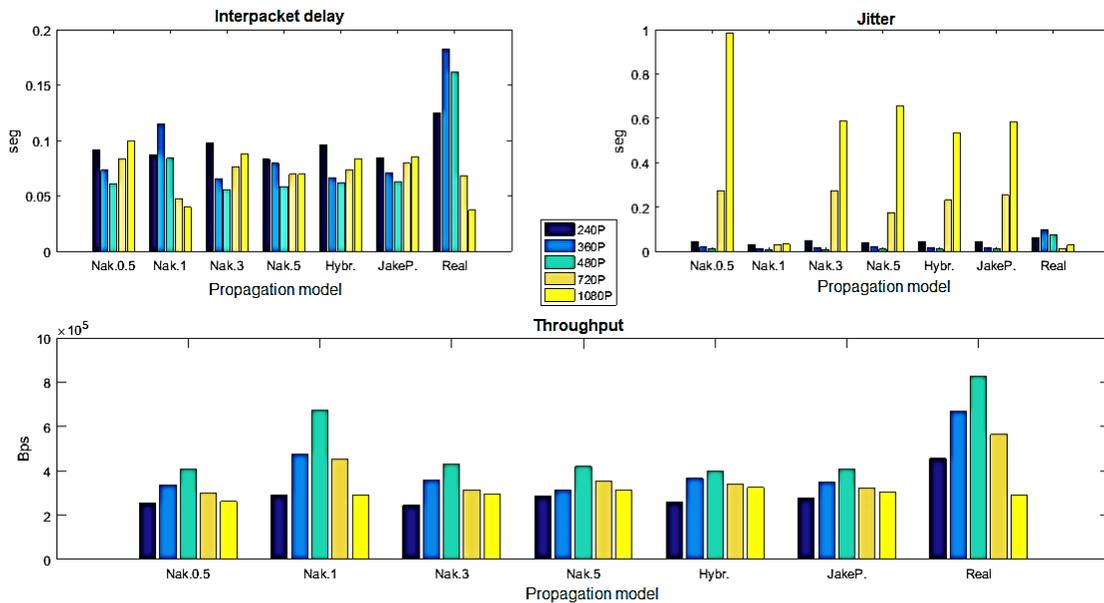


Figura 3.10. Métricas de QoS (*interpacket delay*, *jitter* and *throughput*) con RTMP en el servidor

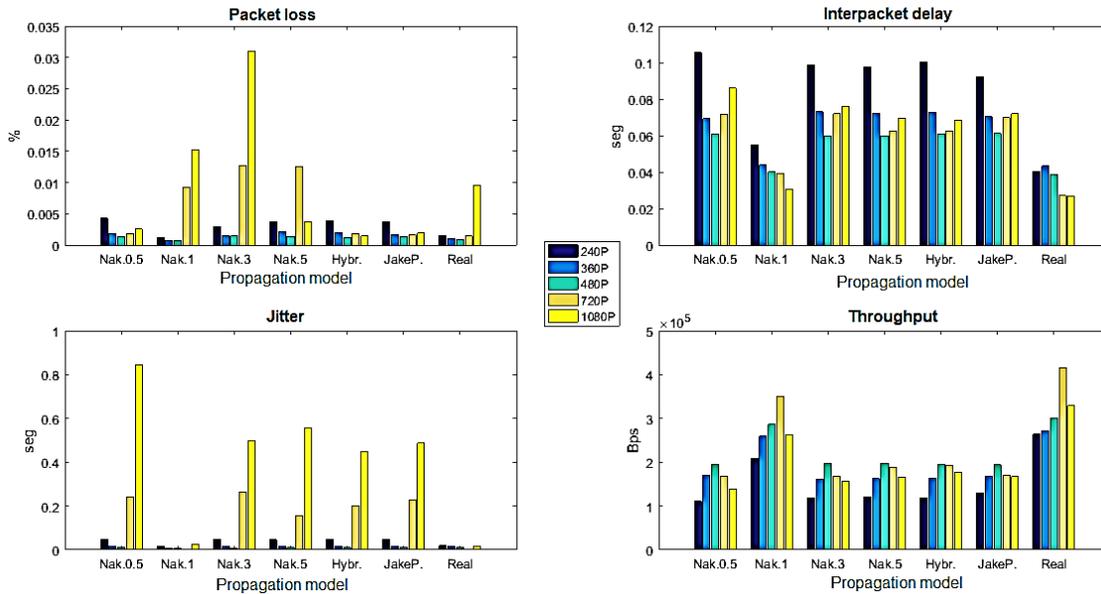


Figura 3.11. Métricas de QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *jitter* and *throughput*) con RTMP en el cliente

Con respecto a las métricas obtenidas usando el protocolo RTSP, se puede observar en el servidor (ver Figura 3.12) que las métricas de QoS (*interpacket delay*, *jitter* y *throughput*), para emulación, presentan un comportamiento similar al entorno real, sin importar el modelo de propagación empleado. Con respecto al cliente (ver Figura 3.13), se observan bajos valores de *packet loss* en los escenarios real y de emulación, excepto para la resolución de 1080p, lo cual deja en evidencia la desventaja de utilizar para alta resolución el protocolo RTSP. Por otro lado, para escenarios de emulación que utilizan el modelo de propagación *Nakagami* con $m=1$, todas las métricas de QoS analizadas, presentan un comportamiento muy similar con el entorno real. En la Figura 3.13 se observa el aumento de los valores de *throughput* a medida que aumenta la resolución, lo cual es una consecuencia directa de la disminución de retardos de paquetes y del *jitter*.

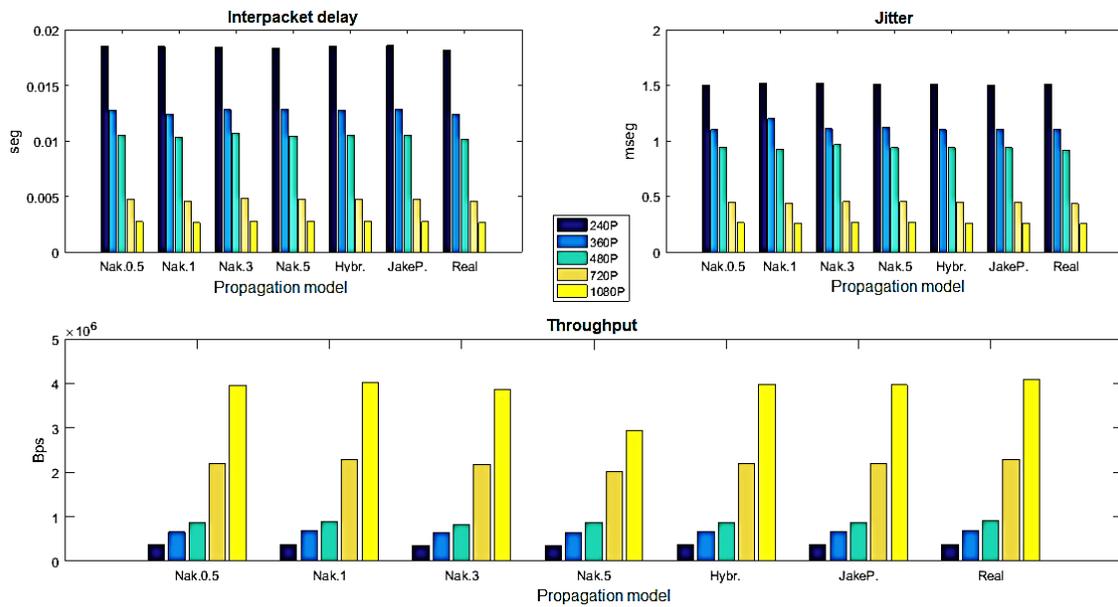


Figura 3.12. Métricas de QoS (*interpacket delay, jitter and throughput*) con RTSP en el servidor

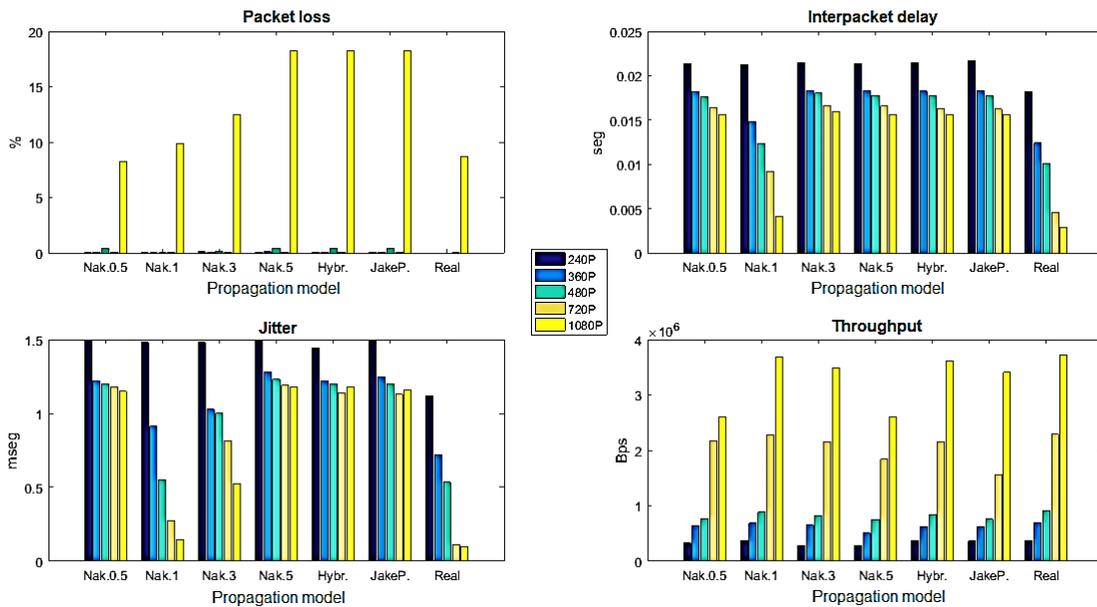


Figura 3.13. Métricas de QoS (*packet loss, interpacket delay, jitter and throughput*) con RTSP en el cliente

En general, las Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 y Figura 3.13, evidencian que el escenario de emulación que utiliza el modelo de propagación *Nakagami* con $m=1$ presenta una mayor similitud con los valores medidos en el escenario real. Tal y como se comentó en secciones anteriores, esta caracterización para este modelo de

propagación es equivalente al modelo de propagación de Rayleigh. La métrica de *packet loss* presenta un comportamiento apropiado para la transmisión de vídeo (< 0,1%) tanto para RTMP como para RTSP para resoluciones iguales o menores de 1280 x 720 (*High Definition*), que son las resoluciones esperadas por los operadores y usuarios para el servicio de LVS en escenarios móviles LTE.

Para la validación analítica de los resultados, se aplica el procedimiento estadístico ANOVA a los valores de QoS obtenidos con cada uno de los protocolos de transporte de vídeo utilizados (RTMP y RTSP), ver anexo A.7.1.1C. Para este caso, se define como variable dependiente las métricas de QoS obtenidos en el escenario de emulación y como variable independiente las métricas de QoS obtenidos en el escenario real. Se plantea la siguiente hipótesis nula: “las medidas de desempeño en términos de métricas de QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *Jitter* y *throughput*) obtenidas en un sistema LTE emulado con NS-3, no presentan diferencias estadísticas significativas con las medidas realizadas en un sistema LTE real para el servicio de LVS”. La Tabla 3.4 y Tabla 3.5 muestran el estadístico F y su probabilidad p al aplicar la prueba con un intervalo de confianza para las medias $\alpha = 0,05$. El valor crítico de F, denominado F_c , que se obtiene al aplicar la prueba es $F_c = 5,31765$ para el protocolo RTMP y para el protocolo RTSP.

Protocolo	Modelo de propagación	Métricas de QoS en el Servidor					
		Interpacket Delay		Jitter		Throughput	
		F	p	F	p	F	p
RTMP	Nakag. m=0,5	1,386225	0,27288	1,271153	0,29223	6,897699	0,03035
	Nakagami m=1	1,724721	0,22550	4,241401	0,07342	1,16789	0,31133
	Nakagami m=3	1,822267	0,21399	1,357135	0,27759	5,87286	0,04162
	Nakagami m=5	2,414281	0,15883	1,022365	0,34155	5,69601	0,04408
	Hybrindbuilding	1,917794	0,20349	1,218388	0,30176	5,651141	0,04474
	JakeProcess	1,915864	0,20369	1,305681	0,28622	5,962011	0,04045
RTSP	Nakag. m=0,5	0,004957	0,94559	0,000544	0,98196	0,004622	0,94747
	Nakagami m=1	0,000489	0,98289	0,000026	0,99607	0,000298	0,98665
	Nakagami m=3	0,007192	0,93450	0,003916	0,95163	0,009007	0,92672
	Nakagami m=5	0,003622	0,95348	0,001871	0,96655	0,132248	0,72553
	Hybrindbuilding	0,004820	0,94635	0,000667	0,98002	0,003003	0,95764
	JakeProcess	0,005531	0,94254	0,000412	0,98431	0,003839	0,95211

Tabla 3.4. Resultados de ANOVA para RTMP y RTSP en el Servidor ($F_c=5,31765$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F > F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada

Protocolo	Modelo de propagación	Métricas de QoS en el Cliente							
		Packet Loss (%)		Interpacket Delay		Jitter		Throughput	
		F	p	F	p	F	p	F	p
RTMP	Nakag. m=0,5	0,097545	0,76278	25,54283	0,00098	1,892289	0,20623	26,41012	0,00089
	Nakagami m=1	0,554302	0,47786	2,199369	0,17635	0,140381	0,71763	1,424654	0,26683
	Nakagami m=3	1,403120	0,27019	31,55439	0,00050	2,565691	0,14787	26,42272	0,00088
	Nakagami m=5	0,475809	0,50983	24,25386	0,00115	1,907317	0,20461	23,83657	0,00122
	Hybrindbuilding	0,235687	0,64035	22,76229	0,00140	2,438367	0,15702	22,82921	0,00139
	JakeProcess	0,236278	0,63994	37,08875	0,00029	2,478587	0,15405	26,25932	0,000902
RTSP	Nakag. m=0,5	3,136e-5	0,99566	2,723220	0,13750	13,05630	0,00685	0,145365	0,71293
	Nakagami m=1	0,012640	0,91325	2,343564	0,16433	3,574165	0,09534	0,000248	0,98781
	Nakagami m=3	0,446614	0,52275	2,998839	0,12156	14,70049	0,00498	0,018766	0,89442
	Nakagami m=5	1,388437	0,27252	2,810915	0,13215	14,20302	0,00547	0,271503	0,61643
	Hybrindbuilding	0,251208	0,62972	2,742367	0,13631	12,96019	0,00698	0,007835	0,93164
	JakeProcess	0,251256	0,62969	2,763422	0,13501	12,88080	0,00709	0,093000	0,768180

Tabla 3.5. Resultados de ANOVA para RTMP y RTSP en el Cliente ($F_c=5,31765$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F > F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada

De los resultados mostrados en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5, se puede deducir que la hipótesis nula sólo es aceptada para el modelo de propagación *Nakagami m=1*, en donde para todas las métricas de QoS medidos, el valor del estadístico F es menor que su valor crítico F_c . Para los modelos de propagación: *Nakagami (m=0,5, m=3 y m=5)*, *Hybridbuilding* y *JakeProcess* se puede afirmar que la hipótesis nula es rechazada, ya que, en al menos una de las métricas analizadas, $F > F_c$.

A continuación, se muestra las representaciones gráficas de los resultados de ANOVA, en donde visualmente se corrobora el cumplimiento o no de la prueba.

La Figura 3.14 y Figura 3.15 presentan para las resoluciones de 480p y 720p, el protocolo RTMP y el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=1$, el cumplimiento de la hipótesis nula para todos los parámetros de QoS definidos. Se aprecia como los valores promedio más/menos los correspondientes intervalos de confianza del escenario emulado están contenidos dentro de los correspondientes intervalos de confianza del escenario real, tanto para el cliente como para el servidor en un ambiente *indoor*.

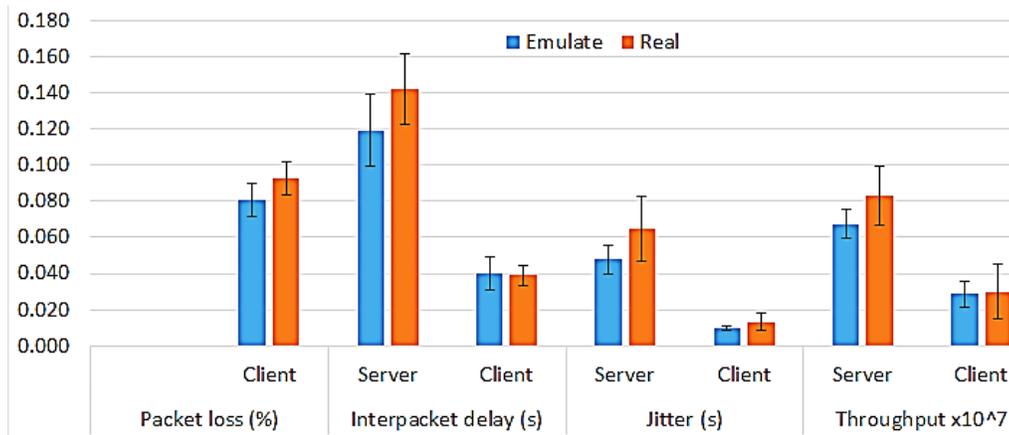


Figura 3.14. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTMP con *Nakagami-m* ($m=1$)

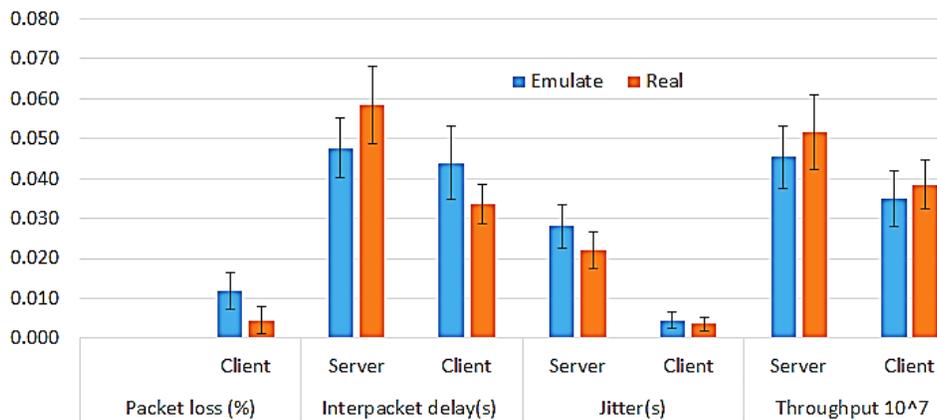


Figura 3.15. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con *Nakagami-m* ($m=1$)

Igual situación se observa en las Figura 3.16 y Figura 3.17, en este caso para el protocolo RTSP.

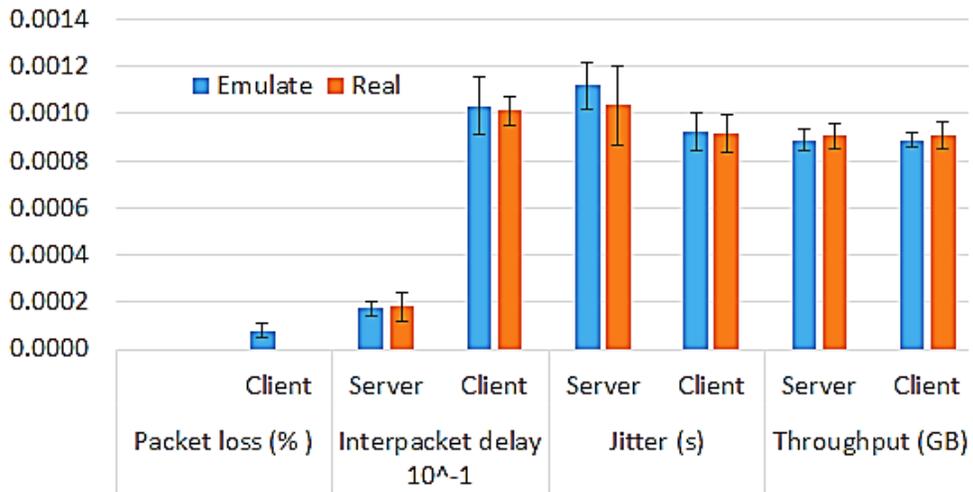


Figura 3.16. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTSP con Nakagami-*m* (*m*=1)

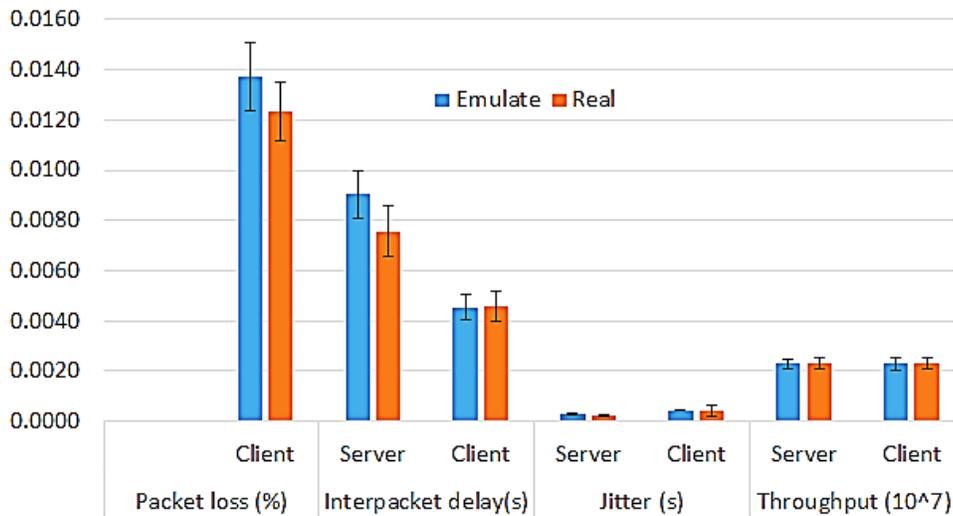


Figura 3.17. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTSP con Nakagami-*m* (*m*=1)

Por otro lado, la Figura 3.18 evidencia el no cumplimiento de la hipótesis nula cuando se observa para el parámetro de *Jitter*, tanto en el cliente como en el servidor, que el valor medio más/menos los intervalos de confianza en el escenario emulado no están contenidos en los valores obtenidos para el escenario real.

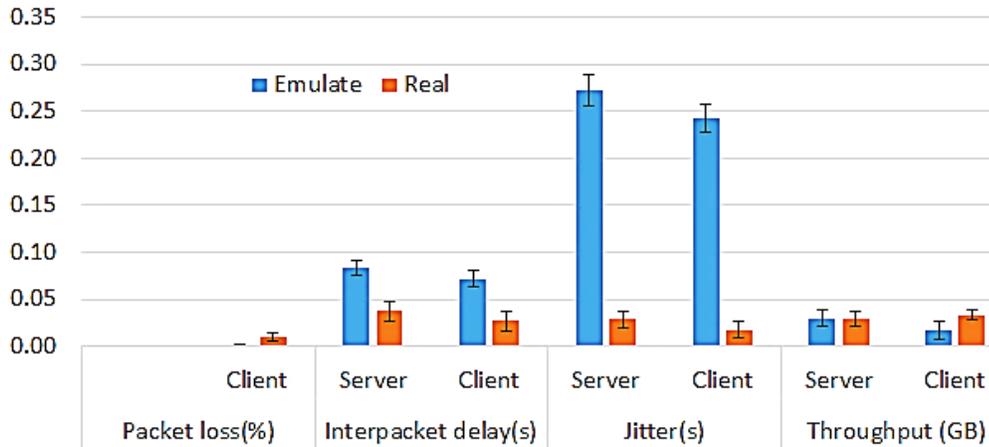


Figura 3.18. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con *Nakagami-m* ($m=0.5$)

3.3.2 Validación de los escenarios de experimentación en exteriores

En las Tabla 3.6 y Tabla 3.7 se muestran los parámetros de configuración y ajustes iniciales para cada uno de los escenarios de experimentación en exteriores.

Parámetro	Descripción	
	Escenario de Emulación	Escenario Real
Potencia operación eNB	RSRQ 19 (125mW)	RSRP 51 (-90 to -89 dBm)
Configuración Capa Física	OFDMA, FDD, Banda 7, Frec. DL= 2644 MHz, Frec. UL=2535, BW cell UL=DL=10 MHz, Nro RB: DL=UL=50. Mod. QPSK	
Tipo de Antena	Coseno, altura 1.5 m	Antena direccional panel 14
Modelo de Propagación	<i>Nakagami</i> ($m = 0.5, 1, 3, 5, 7$), y <i>HybridBuildings</i>	IP-G14-F2425-HV, altura 2.5 m
Potencia Operación UE	RSRP 46 (-94 to -93 dBm), altura 2.5 m, distancia 50 m	RSRP 46 (-94 to -93 dBm), altura 2.5 m, distancia 50 m
Modo de Transmisión	SISO	

Tabla 3.6. Configuración de escenarios de experimentación en exteriores

Codificación de Vídeo	
Codificador	H.264/MPEG-4 AVC: Baseline Profile (BP)
Resolución (px)	480p (854x480); 720p (1280x720)
Tasa de codificación de bits (Kbps)	1128 para 480p y 2628 para 720p
Frames por segundos	30
Codificación de Audio	
Codificador	AAC
Canales	Estéreo
Tasa de bits (Kbps)	128 para 360p y 192 para 720p
Frecuencia de muestreo	44.100 kHz

Tabla 3.7. Ajustes de codificación en exteriores

A continuación, para los dos escenarios, se presentan los resultados obtenidos para diferentes métricas de QoS en la prestación del servicio LVS usando el protocolo RTMP (Figura 3.19 y Figura 3.20) y el protocolo DASH (Figura 3.21 y Figura 3.22).

Las Figura 3.19 y Figura 3.20 muestran los resultados obtenidos para el protocolo RTMP, en el lado del servidor y del cliente respectivamente. Cuando se observan las diferentes configuraciones de propagación (valores de m), los resultados son los esperados. Es decir, cuantos más altos son los valores de m , más bajos son los niveles de desvanecimiento y, por tanto, mejores son las métricas de rendimiento. En comparación con el escenario real, se puede ver una similitud significativa entre los resultados obtenidos en condiciones reales y los logrados a través del modelo *Nakagami* $m = 5$ en el escenario emulado. Esta afirmación es válida tanto para los puntos finales de comunicación (cliente y servidor) como para todas las métricas evaluadas, es decir: *interpacket delay*, *jitter*, y *throughput*. Sin embargo, el uso de valores de m más altos ($m = 7$) o el uso del modelo *HybridBuildings* conduce a resultados más convenientes para el escenario emulado, lo que significa que las condiciones de propagación en el escenario real son más adversas en comparación con estas configuraciones emuladas.

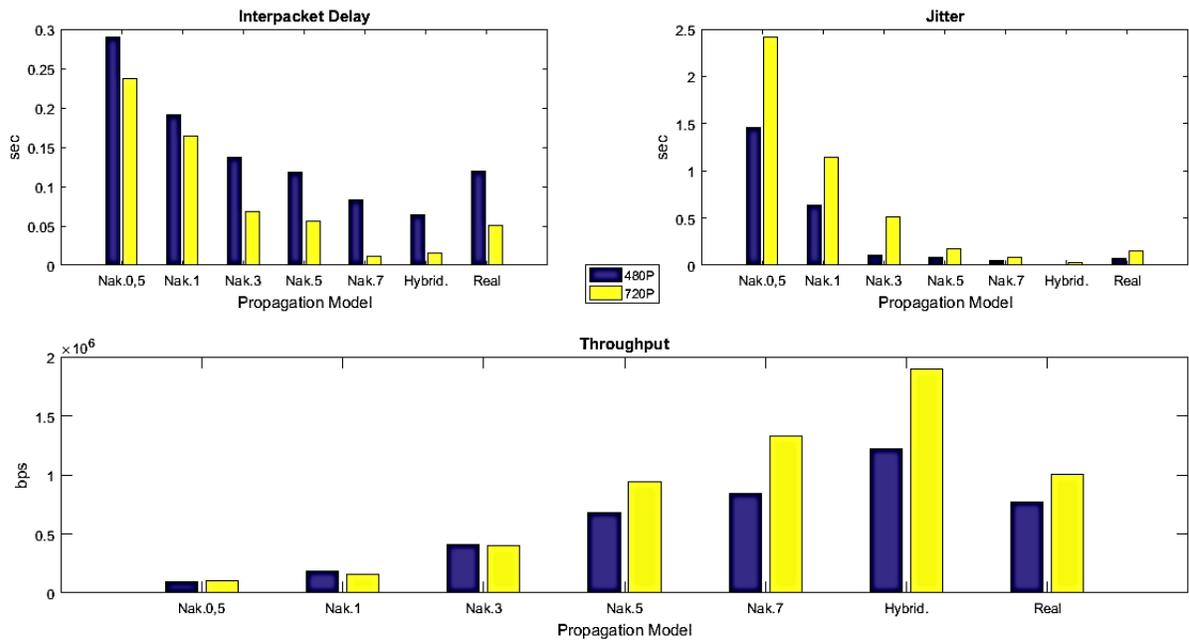


Figura 3.19. Métricas de QoS (*interpacket delay*, *jitter* y *throughput*) con RTMP en el servidor

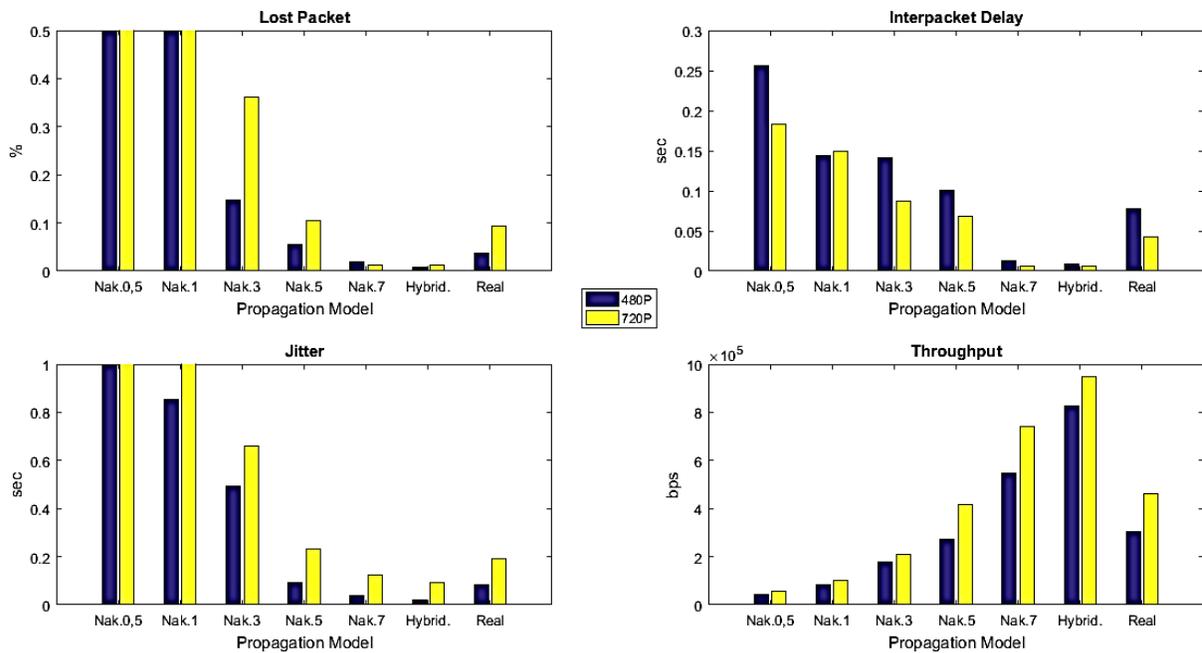


Figura 3.20. Métricas de QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *jitter* y *throughput*) con RTMP en el cliente

Para la métrica de *packet loss*, se puede observar en la Figura 3.20 que se obtiene un valor por debajo del 0.1% de paquetes perdidos en el escenario real con la resolución más alta (720p), lo cual es más que satisfactorio para respaldar el servicio en cuestión. El *packet loss* es aún más bajo para 480p. Nuevamente, para este parámetro (*packet loss*), el escenario emulador que presenta mayor similitud con el escenario real es el que utiliza el modelo *Nakagami* con $m = 5$. Para el caso de la métrica del *jitter*, en el escenario de experimentación real, se alcanzan valores de 0.1s y 0.2s para 480p y 720p respectivamente. La métrica del *throughput* alcanza valores de 0.8 Mbps para 480p, mientras que se obtiene 1 Mbps para la resolución más alta. Como en la métrica anterior de *packet loss*, los resultados más exactos comparados con el ambiente real en exteriores, se obtienen cuando en el escenario de emulación se utiliza el modelo de propagación *Nakagami* con $m = 5$.

Un comportamiento similar, al mostrado por el protocolo RTMP, se observa en las Figura 3.21 y Figura 3.22 para el protocolo DASH. En el caso de la métrica de *interpacket delay*, se puede observar en el lado del servidor (ver Figura 3.21) y del cliente (ver Figura 3.22) que los valores más cercanos a los obtenidos en el escenario de experimentación real en exteriores son de 10ms para la resolución de 480p y 9 ms para la resolución de 720p, los cuales son obtenidos utilizando en el escenario de experimentación emulado el modelo de propagación *Nakagami* con $m = 5$. Se observa un comportamiento similar para el caso de la tasa de *packet loss* (0.2% para ambas resoluciones). Se observa que todas las métricas de QoS bajo estudio presentan cifras similares a las obtenidas en el escenario real cuando se utiliza el modelo de propagación *Nakagami-m* con $m = 5$.

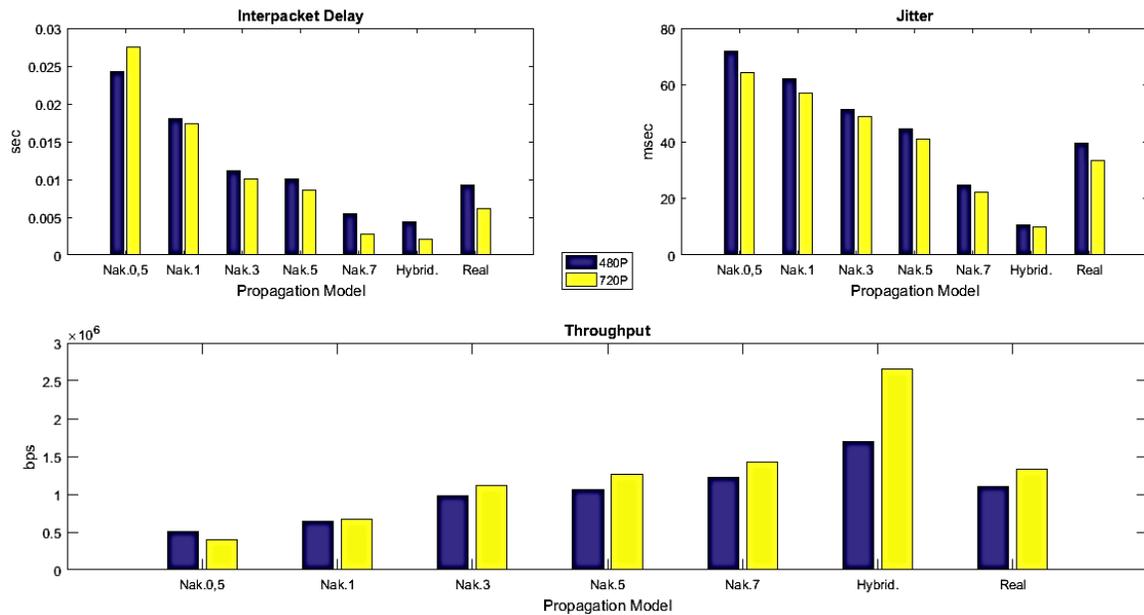


Figura 3.21. Métricas de QoS (*interpacket delay*, *jitter* y *throughput*) con DASH en el servidor

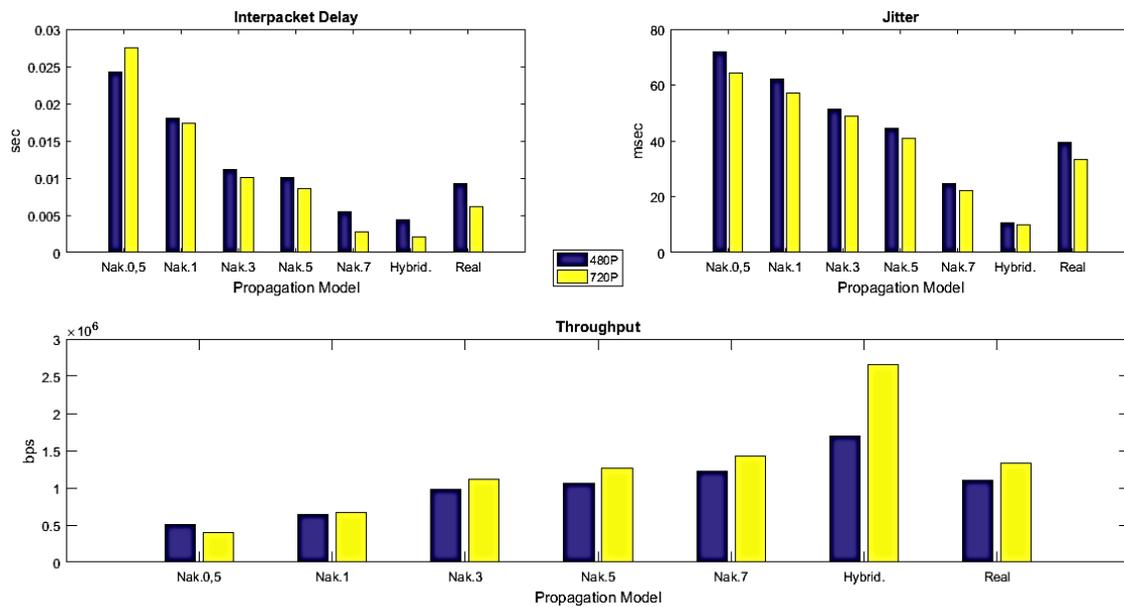


Figura 3.22. Métricas de QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *jitter* y *throughput*) con DASH en el cliente

Comparando ambos protocolos de transporte de video (ver Figura 3.19 y Figura 3.21), se observa que DASH presenta una tasa de *interpacket delay* más reducida, lo que

posibilita mayores niveles de *throughput* en el lado del servidor. A su vez, RTMP presenta una alta tasa de *packet loss* en el lado del cliente, lo que conduce a un *throughput* limitado en comparación con el obtenido con el protocolo DASH (ver Figura 3.20 y Figura 3.22). Para ambos protocolos, DASH y RTMP, se puede observar que los valores obtenidos para el *throughput* son más bajos que los valores de la tasa de codificación de bits que se muestran en la Tabla 3.7. Este hecho se explica por el uso del protocolo TCP. TCP emplea mecanismos de solicitud de retransmisión y detección de errores, que requerirán información adicional de bits de cabecera / ECC, lo cual genera una sobrecarga en la tasa de bits del canal. Esta actividad reduciría el *throughput*, en comparación con la tasa de bits en bruto. Además, se sabe que el *throughput* disminuye aún más cuando el canal está sujeto a ruido e interferencias, lo que es una situación de funcionamiento normal para el sistema LTE propuesto.

Para la validación analítica de los resultados, se aplica el procedimiento estadístico ANOVA (ver anexo B) a los valores de QoS obtenidos con cada uno de los protocolos de transporte de vídeo utilizados (RTMP y DASH), el cual fue explicado en la sección anterior. Se parte de la misma hipótesis planteada; las Tabla 3.8 y Tabla 3.9 presentan los valores F y p obtenidos para cada métrica bajo evaluación, para cada protocolo y para cada modelo de propagación cuando se aplica la prueba ANOVA con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Bajo estos ajustes, el valor crítico de F resultante es $F_c = 18.5128$. De ambas tablas, se puede observar que la hipótesis nula solo se acepta, cuando se utiliza el protocolo DASH, al emplear en el escenario de emulación, el modelo de propagación de *Nakagami* con $m = 5$. Es decir, para *Nakagami* ($m = 5$), no hay diferencia estadística significativa entre los resultados obtenidos. Los otros modelos de propagación muestran una diferencia estadística con el escenario real. Con respecto al protocolo RTMP, la hipótesis nula se acepta para un rango más amplio de configuraciones de *Nakagami* ($m = 3, 5, 7$). Para los otros modelos de propagación probados, *Nakagami* ($m = 0.5, 1$) e HybridBuildings, no se acepta la hipótesis nula, ya que al menos una métrica de QoS presenta una diferencia estadística entre ambos escenarios.

Protocolo	Modelo de Propagación	Métricas de QoS					
		Interpacket delay		Jitter		Throughput	
		F	p	F	p	F	p
RTMP	Nakag.m=0.5	16.807123	0.05466550	15.4051475	0.0592070	43.0450457	0.02245204
	Nakag. m=1	6.2211936	0.13009981	10.4917678	0.0835423	35.4218121	0.02708929
	Nakag. m = 3	0.1229316	0.75936223	2.08613320	0.2854793	15.9527590	0.05734602
	Nakag. m = 5	0.0012703	0.97480493	1.47418867	0.3485968	0.17587860	0.71569193
	Nakag. m = 7	0.5810159	0.52554100	5.39067241	0.1459574	0.55454969	0.53407817
	HybridBuild.	1.1992549	0.38774642	10.0580793	0.0866894	3.51347894	0.20171895
	DASH	Nakag.m = 0.5	65.9247165	0.01483218	43.8060452	0.02207483	36.6570802
Nakag. m = 1		40.411215	0.02386979	34.0278978	0.02815255	23.9115481	0.03936774
Nakag. m = 3		3.24630061	0.21337493	18.7561145	0.05196755	1.77405386	0.31438651
Nakag. m = 5		0.35625244	0.61116261	0.74509864	0.47901178	0.16507128	0.72387886
Nakag. m = 7		2.95446265	0.22778013	16.0170003	0.05713536	0.46332116	0.56630886
HybridBuilding		5.29826715	0.14796576	73.7660456	0.01328679	3.70359888	0.19418103

Tabla 3.8. Resultados de ANOVA para RTMP y DASH en el servidor ($F_c=18.5128$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F > F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada

A continuación, se muestra las representaciones gráficas de los resultados de ANOVA, en donde visualmente se corrobora el cumplimiento o no de la prueba.

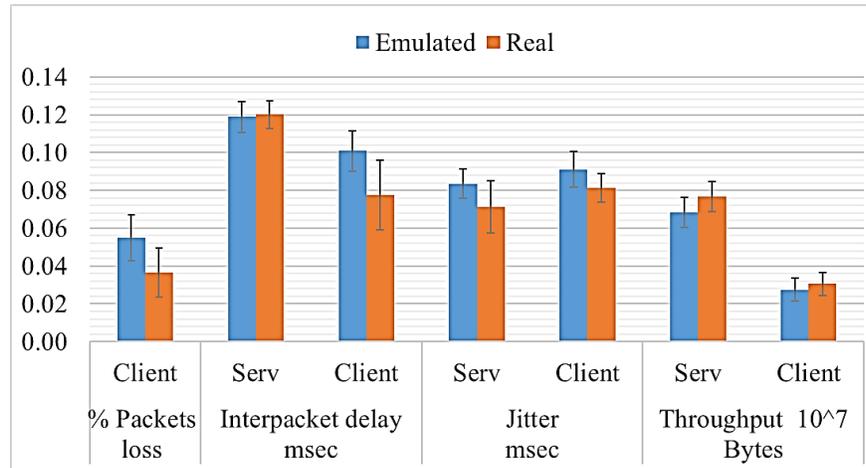


Figura 3.23 Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo RTMP con Nakagami-m ($m=5$)

La Figura 3.23 y Figura 3.24 muestra para las resoluciones de 480p y 720p, el protocolo RTMP y el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=5$; el cumplimiento de la hipótesis nula para todos los parámetros de QoS definidos. Se aprecia como los valores promedio más/menos los correspondientes intervalos de confianza del escenario emulado están contenidos dentro de los correspondientes

intervalos de confianza del escenario real, tanto para el cliente como para el servidor en un ambiente *outdoor*.

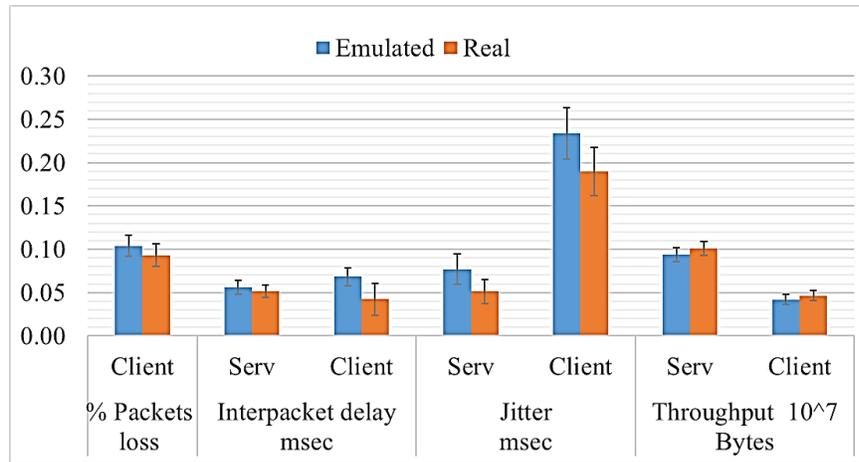


Figura 3.24. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo RTMP con Nakagami- m ($m=5$)

Igual situación se observa en las Figura 3.25 y Figura 3.26Figura 3.21, en este caso para el protocolo DASH.

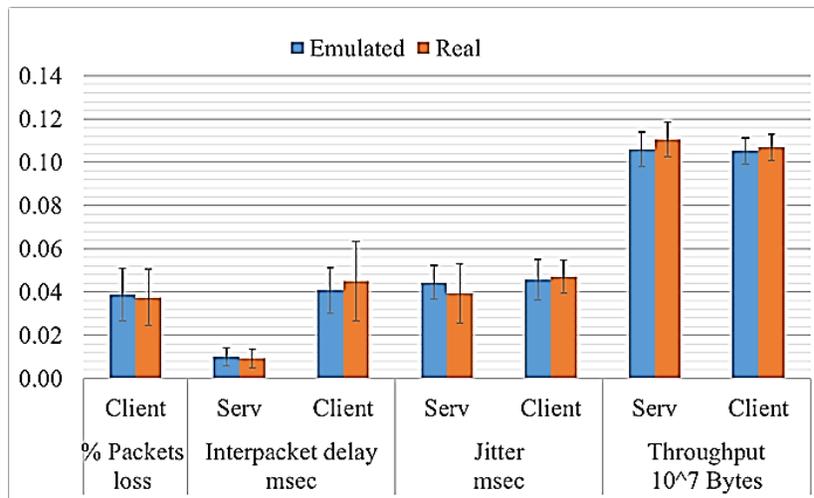


Figura 3.25. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 480p, protocolo DASH con Nakagami- m ($m=5$)

Protocolo	Modelo de propagación	Métricas de QoS												
		Packet Loss (%)		Interpacket delay		Jitter		Throughput						
		F	p	F	p	F	p	F	p					
RTMP	Nakag. m = 0.5	286.70416	0.0034697	15.779608	0.0579216	20.060307	0.0464070	18.611722	0.0489152	13.462017	0.0674359	0.0669133	0.1412257	
	Nakag. m = 1	8.6865317	0.0984188	23.532132	0.0399649	13.346339	0.0674359	13.462017	0.0669133	0.0674359	0.0999334	0.1412257	0.7596139	
	Nakag. m = 3	2.9545353	0.2277762	2.8597111	0.2328931	8.5329536	0.0999334	5.6188506	0.1412257	0.0999334	0.7928917	0.7596139	0.172392	
	Nakag. m = 5	3.0183912	0.2244576	1.0495819	0.4133379	0.0896323	0.7928917	0.1226588	0.7596139	0.0896323	0.5242243	0.172392	0.0366206	
	Nakag. m = 7	0.1529826	0.7334364	8.0887219	0.1045901	0.5851898	0.5242243	4.3478951	0.172392	0.5851898	0.3404837	0.0366206	0.0256163	
	Hybridbuilding	3.6660885	0.1956227	8.9348382	0.0960650	1.5395827	0.3404837	25.816315	0.0366206	1.5395827	0.0204406	37.544007	0.0256163	0.0394166
	Nakag. m = 0.5	63.730072	0.0153312	151.39175	0.0065406	47.427335	0.0204406	37.544007	0.0256163	47.427335	0.0152698	0.0394166	0.0394166	0.3587962
DASH	Nakag. m = 1	105.62641	0.0093349	28.334218	0.0335281	63.992221	0.0152698	23.860046	0.0394166	0.0152698	0.0630182	0.3587962	0.9404542	
	Nakag. m = 3	2.0695598	0.2868756	16.332545	0.0561226	14.384687	0.0630182	1.3964063	0.3587962	0.0630182	0.9594476	0.9404542	0.543199	
	Nakag. m = 5	0.0179791	0.9056098	0.0798046	0.8041142	0.0032944	0.9594476	0.0071166	0.9404542	0.0032944	0.0307229	0.543199	0.2639184	
	Nakag. m = 7	1.2494184	0.3799151	5.7530073	0.1385851	31.056758	0.0307229	0.5273815	0.543199	31.056758	0.0136566	0.2639184	0.3650598	
	Hybridbuilding	5.6864735	0.1398821	5.8734649	0.1362973	71.727843	0.0136566	2.3650598	0.2639184	71.727843	0.0136566	0.2639184	0.3650598	
	Nakag. m = 0.5	286.70416	0.0034697	15.779608	0.0579216	20.060307	0.0464070	18.611722	0.0489152	13.462017	0.0674359	0.0669133	0.1412257	
	Nakag. m = 1	8.6865317	0.0984188	23.532132	0.0399649	13.346339	0.0674359	13.462017	0.0669133	0.0674359	0.0999334	0.1412257	0.7596139	

Tabla 3.9. Resultados de ANOVA para RTMP y DASH en el cliente ($F_c=18.5128$; $\alpha=0,05$). Valores en negrita representan que $F > F_c$ por lo cual la hipótesis nula es rechazada

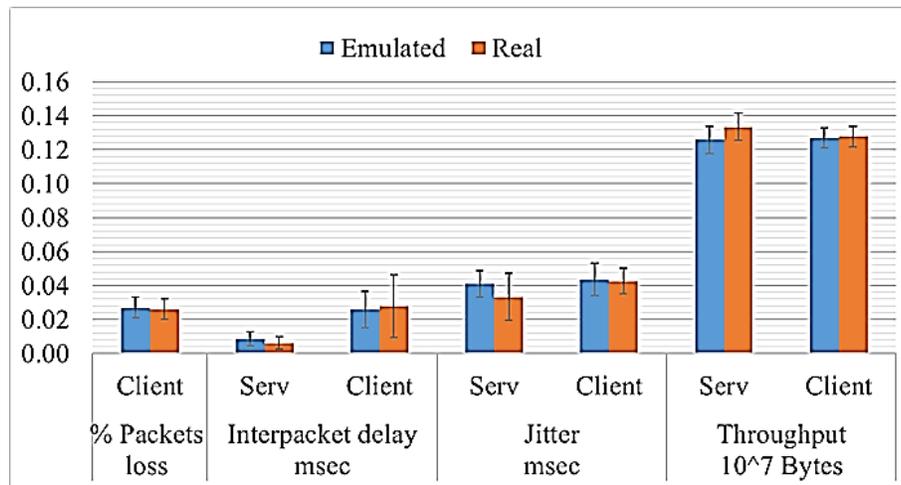


Figura 3.26. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo DASH con Nakagami-m ($m=5$)

Por otro lado, la Figura 3.27 evidencia el no cumplimiento de la hipótesis nula cuando se observa para el parámetro de *Jitter* en el cliente, que el valor medio más/menos los intervalos de confianza en el escenario emulado no están contenidos dentro de los valores obtenidos para el escenario real.

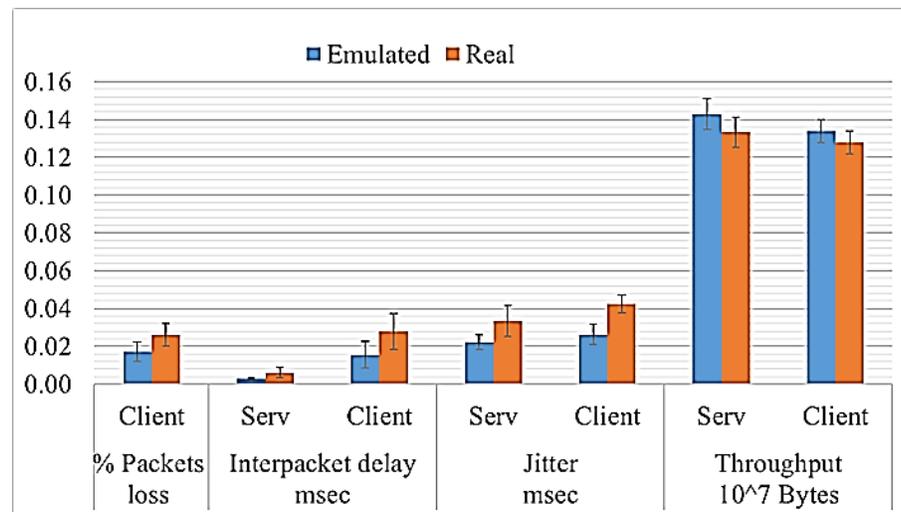


Figura 3.27. Métricas de QoS (media e intervalo de confianza) en el Servidor y el Cliente para una resolución de 720p, protocolo DASH con Nakagami-m ($m=3$)

3.4 Conclusiones preliminares

De acuerdo a los resultados obtenidos, y para las condiciones preestablecidas en los diferentes escenarios de experimentación estudiados, para la implementación del servicio de LVS en una red LTE, se pueden hacer las siguientes apreciaciones:

- En la implementación del servicio y utilizando los protocolos RTMP y RTSP en un escenario de experimentación en ambientes interiores, el modelo de propagación, utilizado en el escenario emulado con NS-3, que aporta mayor fidelidad con respecto a los resultados obtenidos en un escenario real es el modelo de propagación *Nakagami-m* con $m=1$, el cual corresponde a un comportamiento de predicción de canal tipo *Rayleigh*.
- Para un ambiente de exteriores, se puede concluir que, entre los modelos de propagación al aire libre evaluados, con LoS (Line of Sight), utilizados en una plataforma LTE emulada con un servicio LVS, la mejor coincidencia, comparada con el entorno real, se obtiene con el modelo de propagación *Nakagami-m* con $m = 5$.
- Del análisis de los resultados obtenidos en los escenarios real y emulado, se puede afirmar que el escenario de experimentación propuesto, presenta un alto grado de confiabilidad y repetitividad de los experimentos debido al grado de similitud alcanzado, lo cual es avalado mediante la comprobación de la hipótesis nula planteada para la prueba estadística ANOVA. Debido a lo anterior, la plataforma de emulación presentada, es propuesta para realizar diferentes tipos de estudios sobre desempeño de servicios y protocolos de streaming en redes LTE, lo que permitirá subsanar en cierta medida la poca disponibilidad de escenarios de prueba que utilicen elementos reales dentro de la configuración de los mismos.

Capítulo cuarto

4. Caracterización del Tráfico del Servicio de *Live Video Streaming*

4.1 Introducción

En este capítulo, y de acuerdo a las tendencias de mercado de los servicios en las redes móviles inalámbricas dadas en [1], se presenta la caracterización estadística del tráfico del servicio LVS sobre una red LTE emulada que utiliza la técnica de *streaming* adaptativo DASH. La técnica de *streaming* DASH es adoptada por el estándar 3GPP, el cual soporta las actuales redes 4G y es el estándar que se utilizará como tecnología de acceso a muchos de los usuarios de la naciente redes 5G. El proceso de caracterización de tráfico presentado en [16] y el cual es la base para cualquier evaluación de desempeño sobre redes de telecomunicaciones, involucra varias fase, entre las cuales se tienen: definición de escenarios de experimentación, captura de trazas tráfico, análisis de los tipos de *slices* que conforman el video (*Grup Of Pictures - GOP*) y el audio, específicamente los tiempos de llegada y los tamaños; a partir de los anteriores, y mediante un análisis estadístico, se identifican las PDF que describen el comportamiento de cada una de las componentes del servicio. Para agilizar el proceso de extracción de parámetros de las trazas de tráfico, se propone en este trabajo un analizador sintáctico. Un aspecto a resaltar del proceso de caracterización

estadístico, es el uso de una plataforma de pruebas del sistema de comunicaciones LTE que considera condiciones de funcionamiento reales.

4.2 Caracterización del tráfico del servicio de LVS

Para realizar el estudio que facilita caracterizar el tráfico del servicio LVS en una red LTE emulada que utiliza la técnica de *streaming* adaptativo DASH, se emplea el escenario de emulación presentado en la Figura 3.1; el cual fue validado en la sección 3.3. Para definir los escenarios de experimentación, y considerando las situaciones más comunes para un usuario en un sistema móvil celular, se utilizan 5 ambientes de pruebas. En el primer ambiente un usuario UE estático se encuentra ubicado a una distancia de 30 m del eNB; en el segundo, tercero y cuarto ambiente, el usuario UE se aleja del eNB (evolved NodeB) con velocidades de 1 mps (3.6 Kmph), 2 mps (7.2 Kmph) y 3 mps (10.8 Kmph) respectivamente, en una dirección que sigue una línea recta $y=x$. En el quinto ambiente, el UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria. Para todos los ambientes de prueba, se seleccionan 4 categorías de vídeos para su transmisión, los cuales se ajustan a las características espacio-temporales definidas en el Anexo I, cuadro A.1 de la recomendación ITU-T 910 [39], estas son: entrevista (categoría A), dibujos animados (categoría B y D), partido de fútbol (categoría C) y película (Categoría E). Para cada categoría de vídeo se realizan 10 pruebas, con duración de 180 s cada uno. Al reproducir el video, en el receptor (cliente) se extraen las trazas de tráfico, las cuales son capturadas con el software de análisis de tráfico *Wireshark* [101], estas trazas son el insumo para realizar el modelo estadístico de tráfico para cada uno de los ambientes de experimentación previamente definidos. En el proceso de obtener el modelo estadístico de tráfico, es necesario realizar algunas actividades particulares, entre las cuales se tiene: *i)* Leer la información de las trazas capturadas, para lo cual se requiere exportar a un archivo plano, tipo .txt, las trazas tipo .pcap obtenidas con el *wireshark*. *ii)* Identificar y analizar los tiempos de llegada y los tamaños de las componentes del video (*Grup Of Pictures - GOP*) y el audio. Debido al grado de complejidad que tiene esta actividad, dado que toda la información del tiempo de llegada y tamaños de los diferentes tipos de *slices* de audio y video se encuentran de forma entrelazada en la traza capturada, se propone

un módulo denominado analizador sintáctico, el cual fue desarrollado en Matlab. Este analizador entrega un archivo organizado en formato .txt de la información necesaria para realizar la siguiente actividad. *iii)* Identificar las funciones de densidad de probabilidad – PDF que describen el comportamiento de los diferentes tipos de *slices* de vídeo y audio que conforman el servicio de LVS. La Figura 4.1 muestra un esquema funcional de las actividades enunciadas. A continuación, se describe de forma general las actividades enunciadas en el proceso de obtención del modelo estadístico de tráfico.

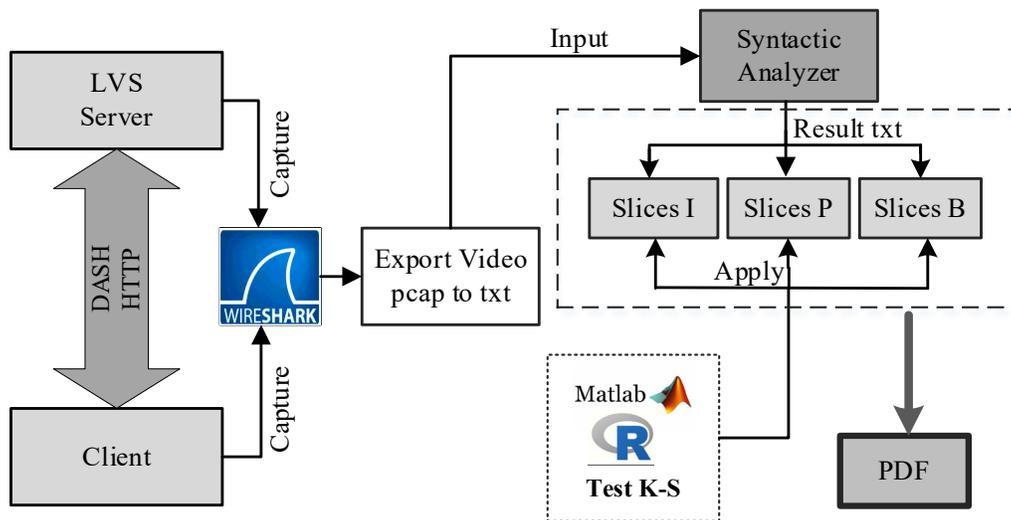


Figura 4.1. Esquema funcional del proceso de caracterización o modelado estadístico de tráfico

4.2.1 Lectura de la información de las trazas capturadas.

Para el proceso de lectura de información de las trazas obtenidas con la herramienta de análisis de tráfico *wireshark*, se debe inicialmente exportar el archivo *.pcap* a un archivo plano, tipo *.txt*. Para obtener la información de las clases de *slices*, audio o video, se debe configurar el filtro correspondiente. Para audio se utiliza `http.content_type == "audio/mp4"` y para video `http.content_type == "video/mp4"`.

Es necesario en el *wireshark*, en el menú *Packet Details* desplegar la información de *Media Type*. Al momento de exportar a un archivo plano, se debe incluir la información de *Packet details* y *Packet Bytes*, la cual contiene la información detallada de cada *slice*. Con esta información, para el caso de *slices* de vídeo, se realizará la búsqueda

sintáctica del tipo de GOP (I, P o B); los *slices* de audio no tienen esta clasificación. En la Figura 4.2 se muestra el proceso descrito anteriormente.

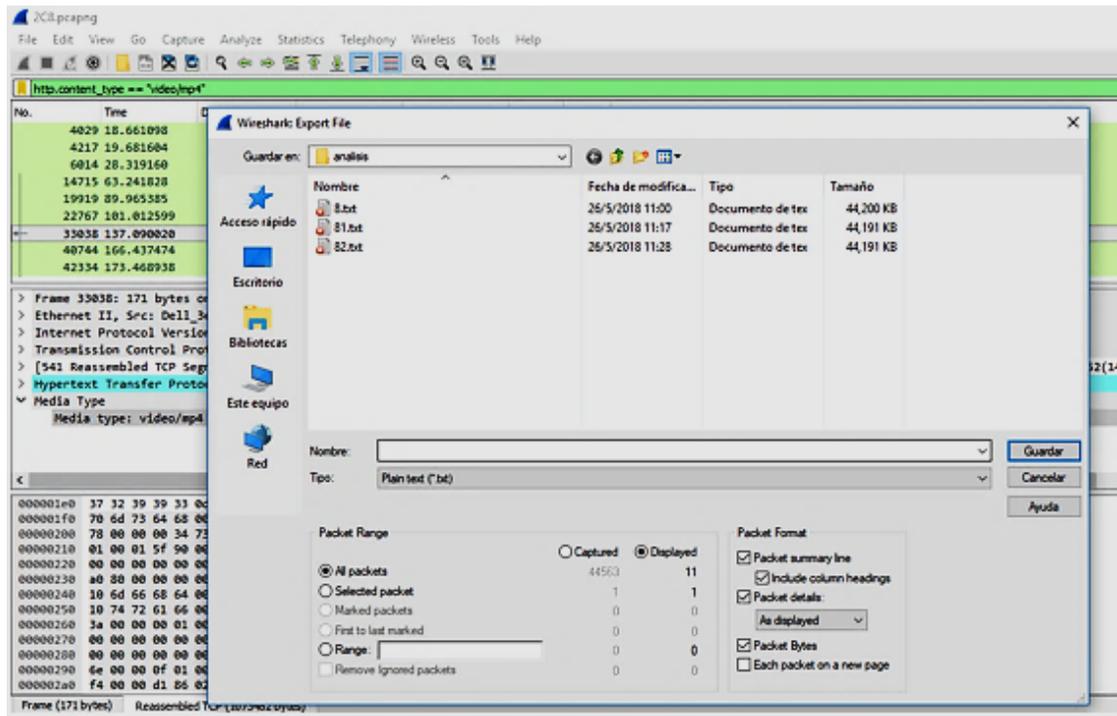


Figura 4.2. Exportar archivos planos tipo texto con *wireshark*

4.2.2 Analizador sintáctico

De las actividades descritas en la sección 4.2 para obtener el modelo estadístico de tráfico, el proceso de extracción, identificación de los *slice* (audio y video) y la clasificación del tipo de *GOP* de video (I, P o B), son las actividades que requieren mayor tiempo y trabajo debido a los altos volúmenes de tráfico que son manejados por el servicio de vídeo en vivo. Además, estos *slice* son enviados a la red de forma entrelazada, lo que hace que el proceso sea una tarea bastante compleja. El analizador sintáctico propuesto, agiliza las actividades antes descritas, automatizando mediante un *script* en Matlab® el proceso de identificación de tipos de *slice*, entregando de forma automática la información requerida para su posterior análisis.

Para dar una idea del alto volumen de tráfico que manipula el servicio de LVS, en la Figura 4.3 se muestra mediante una curva los paquetes capturados en 60 s, para un test en particular de 180 s de duración. Se observan en formato de barras el tráfico de audio (rojo) y video (azul) obtenidos con la herramienta *wireshark*. La información presentada en este formato de la Figura 4.3 permite la visualización del *throughput*. Así es posible observar las grandes diferencias entre el *throughput* del video y el de audio. Además, a nivel de paquetes se podría, de forma intuitiva, afirmar que el tamaño del audio presenta un comportamiento uniforme, lo cual deberá ser confirmado con la obtención de las PDF para este tipo de *slice*. Sin embargo, el video al estar conformado por los GOP (I, P, B) necesita un análisis más granular, es decir, es necesario identificar las componentes de vídeo y la PDF que represente su comportamiento. Es en este punto donde el analizador sintáctico propuesto aporta, identificando, separando y exportando automáticamente, la información de los *slice* del video y audio a partir de las trazas de tráfico reales obtenidas del escenario de experimentación.

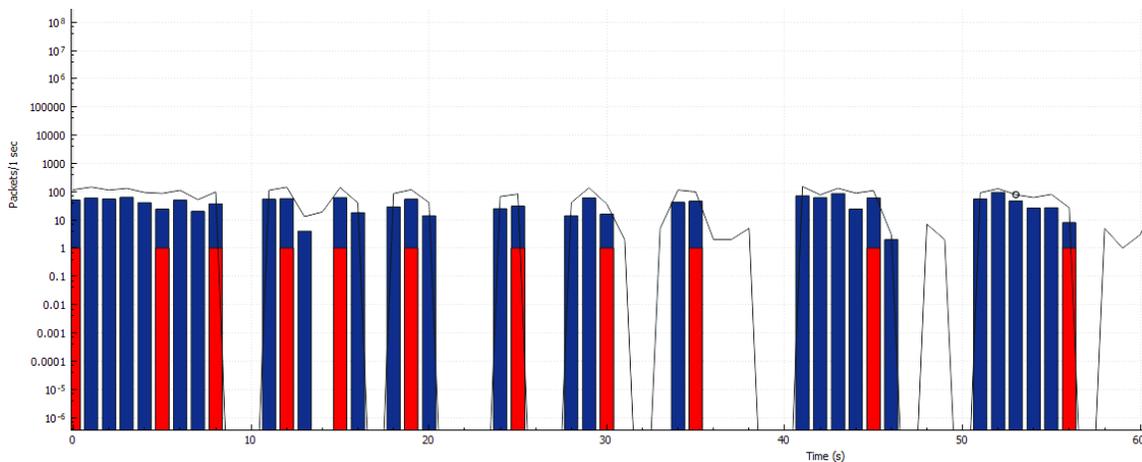


Figura 4.3. Total de paquetes capturados en un test con wireshark

Las entradas de un analizador sintáctico son los *token*, los cuales para este caso son las trazas de tráfico adquiridas con *wireshark* en formato de texto plano. El analizador en primer lugar, identifica mediante la variable “*Word*” si se trata de un *slice* de audio o vídeo; si corresponde a un *slice* de audio, se identifica el tiempo de llegada y el tamaño. Si por el contrario el *slice* es de video, adicionalmente se debe de identificar el tipo de GOP. La Figura 4.4 muestra el diagrama de flujos del analizador sintáctico propuesto.

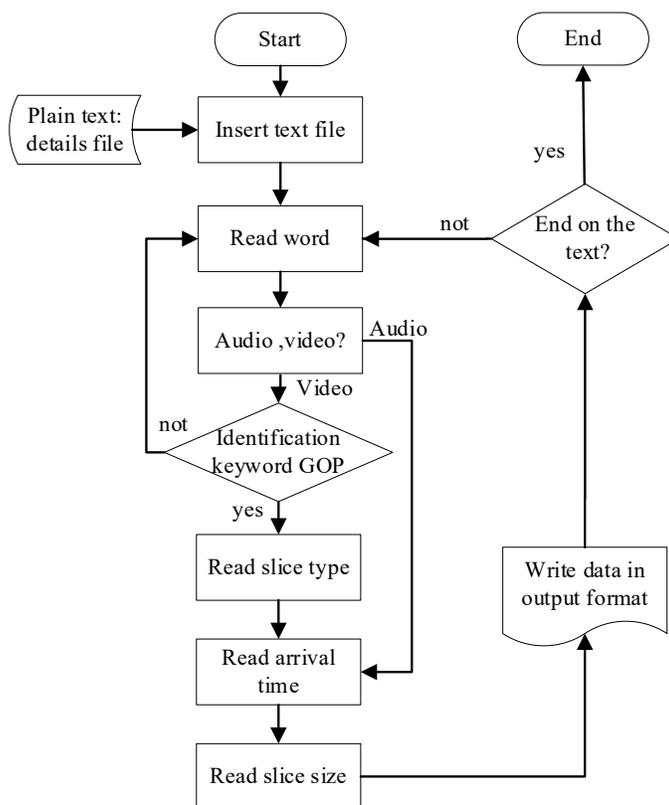


Figura 4.4. Diagrama de Flujos del analizador sintáctico del servicio de LVS

En la actividad de identificar el tipo del GOP para los *slice* de video, se busca la palabra clave de inicio de GOP; para este caso y teniendo en cuenta el estándar Internacional ISO/IEC 13818-1 [113] y lo presentado por [114] y [115], se define como: “00 00 00 01”, al encontrar esta secuencia de identificación del GOP, se analizan los 2 bytes que se ubican después de este identificador; de estos 2 bytes, el último byte, codificado en hexadecimal, contienen la información del tipo de *slice*. Para extraer la información de este byte, se debe escoger el bit menos significativo, del primer carácter hexadecimal, y el bit más significativo del segundo carácter hexadecimal. De acuerdo con [116], el tipo de *slice* se codifica de la siguiente forma: 00=P, 01=B y 10=I. En la Figura 4.5 se presenta un ejemplo con lo anteriormente descrito; en donde la variable “*Word*” define que se trata de un *slice* de video, se observa adicionalmente el tiempo de llegada y tamaño de *slice*, además se identifican los segmentos TCP reensamblados. Después de la palabra de identificación del GOP aparecen los 2 bytes siguientes (00 01). Para la identificación del tipo de *slice*, se utiliza el tercer y cuarto carácter codificados en

hexadecimal: 01H (0000 0001). En negrita se resaltan los bits que codifican, en binario, el tipo de *slice*, para este caso 00 que corresponde a un *slice* tipo P.

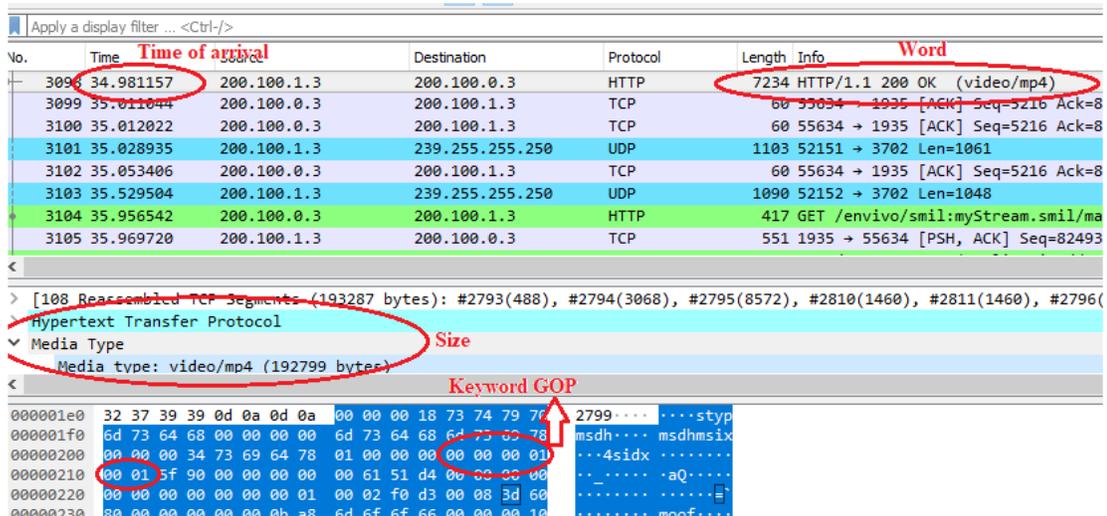


Figura 4.5. Pantallazo de datos de entrada del analizador sintáctico propuesto

Finalmente, la salida del generador sintáctico, entrega un archivo de Excel con la correspondiente información ordenada de la diferencia entre los tiempos de llegada y tamaño de los tipos de *slice* (audio y video), adicionalmente el tipo de GOP (I, P o B) para el caso de *slice* de video. Con la anterior información, y mediante la ayuda de las herramienta *dfitool* de Matlab [117] y el software de análisis estadístico R [118] se realiza, en la siguiente sección el análisis estadístico mediante la tipificación de las funciones de densidad de probabilidad - FDP que describen su comportamiento. En el anexo C.1 se presenta el *script* en Matlab del analizador sintáctico.

4.2.3 Identificar las funciones de densidad de probabilidad – PDF

Para identificar las PDFs se utiliza el *toolbox dfitool* de Matlab, el cual es una aplicación que tiene la capacidad de ajustar de manera interactiva distribuciones de densidad de probabilidad de los datos importados desde el *Workspace* de Matlab. Esta herramienta cuenta con veintidós PDF disponibles para análisis. En *dfitool* se carga la información entregada por el analizador sintáctico, la cual corresponde a la diferencia entre el tiempo de llegada de *slices* sucesivos y su respectivo tamaño, se visualiza el conjunto de datos almacenados a través de un histograma, al cual se superpone una PDF que intenta adaptarse a éste, la curva que mejor se ajuste al histograma es la

hipótesis nula que debe ser validada con una prueba de bondad y ajuste. La sección *Set Bin Rules* de *difftool* contiene opciones de visualización con distintas reglas y manejo de datos en el histograma. Se usaron dos reglas: la regla de *Freedman Diaconis* y la regla *Number of bins*. La regla *Freedman Diaconis* es utilizada por defecto en *difftool* y genera un histograma con una forma definida [119]; la regla *Number of bins* hace una división del rango a fin que el histograma tenga el número de barras especificadas, de esta forma se busca un ajuste más preciso de la forma. Con la opción *New Fit* se ajustan las diferentes distribuciones de densidad de probabilidad, de las cuales se busca gráficamente la que mejor describa los datos. La Figura 4.6 muestra un histograma para un *slice* de tiempo entre llegada particular, adicionalmente se aprecian diferentes PDF, entre las cuales se podría seleccionar la hipótesis nula.

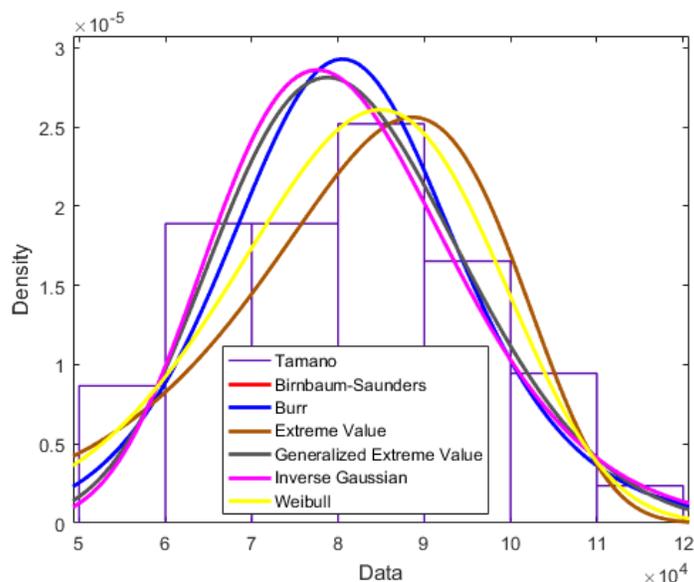


Figura 4.6. Histograma y diferentes PDF generadas con el toolbox *difftool* de Matlab

- *Prueba de bondad y ajuste*: La prueba de bondad es una herramienta utilizada para medir el grado de ajuste de un modelo estadístico. Las medidas de bondad ayudan a determinar el grado de similitud entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio. Estas medidas se utilizan para corroborar las hipótesis propuestas. Existen varias pruebas de bondad y ajuste (ver Anexo C.2), entre las cuales se tiene:

- Prueba de Kolmogórov-Smirnov
- Prueba de Chi cuadrada
- Prueba de Anderson-Darling
- Criterio de Cramér-von Mises
- Test de Shapiro–Wilk

De las anteriores, se selecciona la prueba de bondad y ajuste de *Kolmogórov-Smirnov (K-S)*, debido a que es una prueba no paramétrica más exacta, ya que trabaja con las distribuciones de probabilidad acumuladas (Cumulative Distribution Function – CDF); adicionalmente, es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución [120]. Para aplicar la prueba K-S, se desarrolla un *script* en *Matlab* (ver Anexo C.3) que ayuda a medir el grado de similitud entre los datos obtenidos en la práctica con los datos teóricos específicos (hipótesis nula). Con la herramienta *dfittool* se crean los vectores de las CDF para las distribuciones respectivas de tamaño o tiempo para cada conjunto de *slice*, las cuales se exportan al *Workspace* de *Matlab*. El *script* en *Matlab* para aplicar la prueba, toma como parámetros de entrada los vectores con la CDF de los datos teóricos y los de la hipótesis nula. La forma en que se halla la variable de contraste (D_α) es determinada por el grado de confianza del 95% que se requiere para este análisis. Para calcular la variable de contraste se utiliza la ecuación (4.1), la cual es empleada para la prueba de K-S con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y solo se aplica para muestras con un mínimo 50 datos (N). Los valores α , para conjuntos de datos con $N<50$ muestras se encuentran tabulados en [120]. Es pertinente aclarar que todos los conjuntos de datos utilizados en este trabajo tienen un número de datos (N) mayor a 50.

$$D_{0.05} = 1.36/\sqrt{N} \quad (4.1)$$

El *script* diseñado, calcula la probabilidad observada acumulada (POA) para cada uno de los test, en cada una de las pruebas diseñadas, para todos los tipos de *slice*; las cuales pertenecen a los CDF prácticos. Igualmente, se carga la probabilidad esperada acumulada (PEA) de la hipótesis nula, la cual toma la CDF generada con la herramienta *evaluate* de *dfittool*. A continuación, se realiza el cálculo del valor estadístico de la prueba (D), el cual es el valor máximo de la

diferencia absoluta de POA y PEA de la hipótesis nula. La Figura 4.7 muestra el estadístico de prueba a partir de las dos CDF, el cual representa la máxima distancia entre las dos.

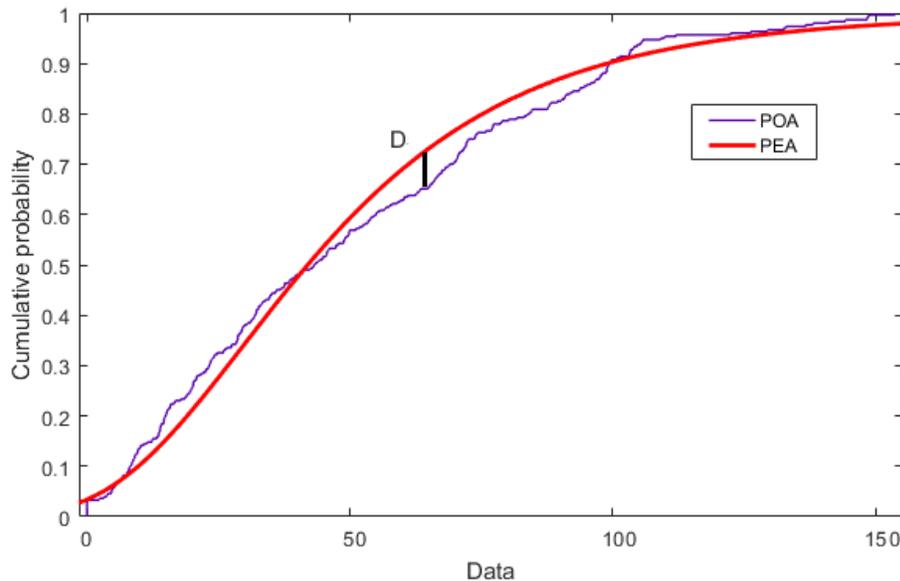


Figura 4.7. Representación de D a partir de la POA y PEA

Una vez obtenido el valor estadístico de prueba (D), se compara con el valor de contraste ($D_{0.05}$) y se define si la hipótesis nula se acepta o rechaza. El criterio de selección es el siguiente:

$$\text{Si } D \leq D_{0.05} \Rightarrow \text{Aceptar } H_0$$

$$\text{Si } D > D_{0.05} \Rightarrow \text{Rechazar } H_0$$

Durante el proceso de análisis estadístico, se presentaron algunos inconvenientes en la asignación de la hipótesis nula de forma directa mediante la herramienta *difftool*. El inconveniente radica principalmente en que los histogramas, que representa la información de algunos *slice*, no se les puede asignar una PDF (hipótesis nula); por lo cual fue necesario usar una técnica que permitiera manejar datos atípicos. Esta técnica sugiere tratar desviaciones y datos atípicos presentes en el conjunto de datos obtenidos del experimento; estos valores atípicos pueden llevar a análisis estadísticos erróneos o poco exactos. En este proceso, se utiliza el software estadístico R para realizar un pre-análisis de los datos. Para esta tarea, se cargan los datos suministrados por el analizador sintáctico y se utiliza la herramienta de diagrama de caja-bigotes, la

cual es una representación visual que describe la dispersión y simetría de los datos a analizar. La información observada en un diagrama de caja-bigotes, ver Figura 4.8, es:

- i) La mediana: representada por la línea de la caja;
- ii) Caja de rango intercuartil: distancia entre el primer cuartil y el tercero $Q3-Q1$, representa el 50% intermedio de los datos y
- iii) Los bigotes: los cuales se extienden de cualquier lado de la caja, representan los rangos del 25% de valores de datos de la parte inferior y 25% de la parte superior, excluyendo los valores atípicos. La asimetría del diagrama indica que los datos pueden no estar distribuidos normalmente. Para el manejo de datos atípicos, y según lo planteado por el test de *Tukey*, se eliminan los valores atípicos extremos, y se conservan dentro del análisis los valores atípicos leves [121]. Con este nuevo conjunto de datos, se realiza el proceso de identificación de las PDF como se explica al inicio de esta sección.

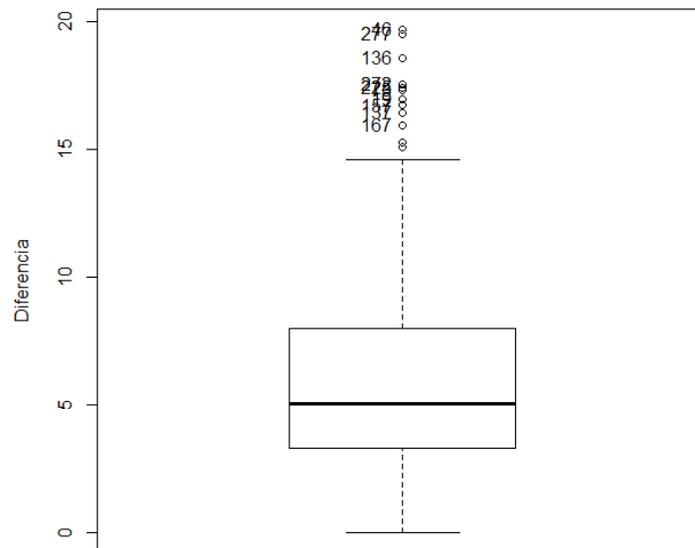


Figura 4.8. Diagrama de cajas - bigotes

4.3 Modelo de tráfico

En la obtención del modelo de tráfico del servicio LVS en redes LTE emuladas, se presenta inicialmente, el desarrollo de las actividades definidas en la sección 4.3 para un caso particular. Al finalizar esta sección, se presentan los resultados generales de PDF encontradas para los diferentes escenarios y casos de experimentación propuestos.

En la definición del caso particular, se selecciona un UE que se encuentra alejándose del eNB con una velocidad de 1 mps (3.6 Kmph) y consume vídeo en vivo de categoría B (dibujos animados), se realizan 10 pruebas con duración de 180 s cada por prueba.

Como resultado de las actividades descritas en las secciones 4.2.1 y 4.2.2, el analizador sintáctico entrega un archivo de Excel, con varias hojas, con la correspondiente información ordenada de la diferencia entre los tiempos de llegada, tamaño de *slice* para video y audio. La Figura 4.9 muestra la información de la diferencia entre tiempo de llegada de *slices* tipo P.

	A	B	C	D	E	F	G	H
241	11.621306							
242	11.621306							
243	11.621306							
244	11.852249							
245	11.852249							
246	11.895019							
247	11.895019							
248	11.895019							
249	11.953868							
250	11.953868							
251	11.953868							
252	12.072981							
253	12.072981							
254	12.072981							
255	12.094117							
256	12.094117							
257	13.966187							
258	13.966187							
259	13.966187							
260	15.241189							
261	15.241189							
262	19.687676							
263	19.687676							

At the bottom of the spreadsheet, there are several tabs: 'Tamanol', 'DifTiempoI', 'TamañoP', 'DifTiempoP' (selected), 'TamañoAudio', and 'DifTiempoAudio'.

Figura 4.9. Salida del generador sintáctico

Posteriormente se realiza la actividad presentada en la sección 4.2.3; en donde a partir de la herramienta *dffitool* se genera el histograma y se busca la hipótesis nula (H_0). La Figura 4.10 muestra el histograma de los *slices* de la diferencia de tiempos de las tramas P y las PDF de las posibles hipótesis nulas (H_0) a validar con la prueba de bondad y ajuste de K-S. La Figura 4.11 muestra la probabilidad observada acumulada (POA) de los *slices* de la diferencia de tiempos y la probabilidad esperada acumulada (PEA) de las diferentes hipótesis nulas a validar.

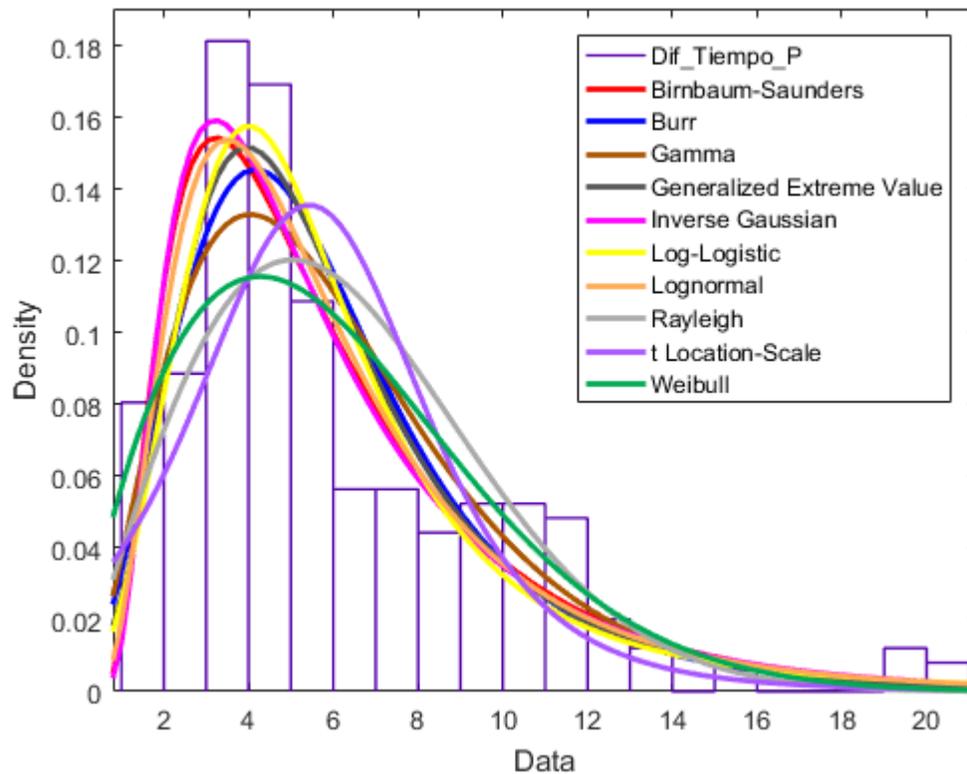


Figura 4.10. Histograma de diferencia de tiempos de slices P y las PDF de las posibles H_0

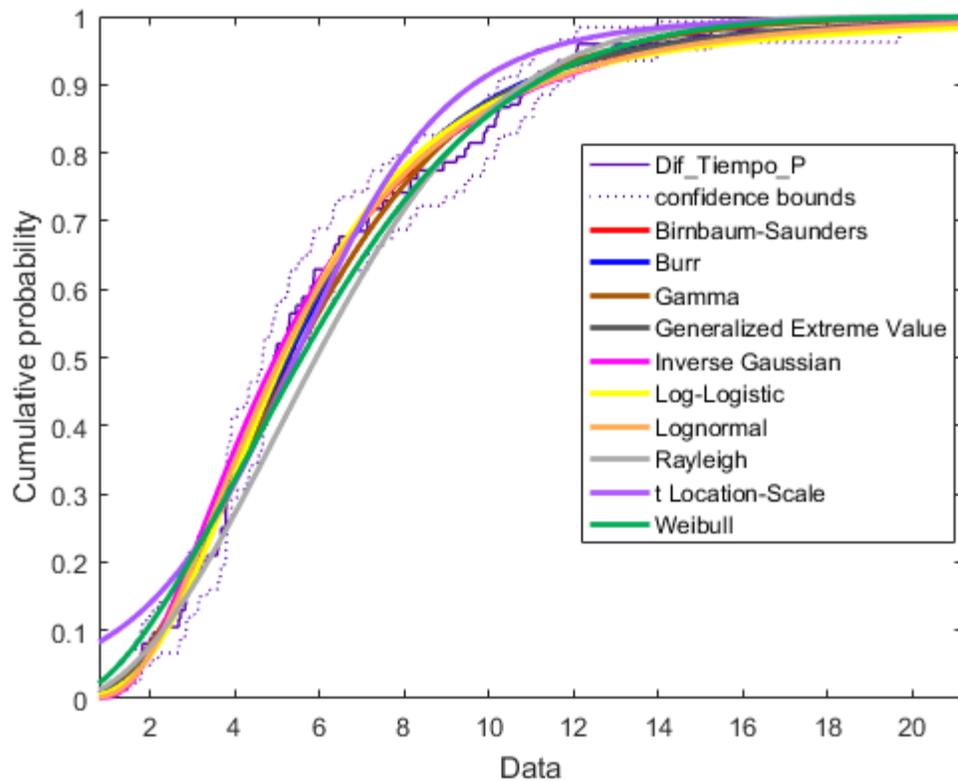


Figura 4.11. POA de slices de diferencia de tiempos y la PEA de las H_0

La Tabla 4.1 muestra los valores calculados, con el *script* en *Matlab*, de los valores estadístico de prueba (D) y su comparación con el valor de contraste ($D_{0.05}$) para las posibles hipótesis nulas mostradas en la Figura 4.10 y Figura 4.11. Se aprecia que solo la hipótesis nula que propone que los datos analizados se ajustan a una PDF de “*Inverse Gaussian*” es válida. Los parámetros para la PDF encontrada se muestran en la Figura 4.12, en donde se presenta el tipo de distribución, la media y varianza calculada con el estimador de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*); Adicionalmente se muestran los parámetros que definen la distribución junto con su error estadístico y se presenta una matriz de covarianza; en donde los elementos de la diagonal de la matriz contienen las varianzas de las variables, mientras que los elementos que se encuentran fuera de la diagonal contienen las covarianzas entre todos los pares posibles de variables. Este último parámetro no tiene relevancia en el análisis estadístico de los modelos encontrados en este trabajo. En el Anexo C.3.2 se encuentran los resultados de las pruebas K-S para todos los escenarios propuestos en este trabajo.

PDF Hipótesis Nula H_0	Valor de Contraste $D_{0.05}$	Valor estadístico D	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0775	0.0799	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0775	0.1073	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0775	0.112	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme Value	0.0775	0.1015	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0775	0.0623	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.0775	0.1004	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0775	0.0799	Hipótesis Rechazada
Rayleigh	0.0775	0.1613	Hipótesis Rechazada
t Location-Scale	0.0775	0.1164	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0775	0.1123	Hipótesis Rechazada

Tabla 4.1. Resultados de la prueba de K-S para diferentes hipótesis nulas propuestas

```

Results:
Distribution:      Inverse Gaussian
Log likelihood:  -636.095
Domain:          0 < y < Inf
Mean:            6.08484
Variance:        16.8464

Parameter  Estimate  Std. Err.
mu         6.08484  0.260632
lambda     13.3733  1.20096

Estimated covariance of parameter estimates:
              mu          lambda
mu          0.0679291    4.59288e-09
lambda     4.59288e-09    1.44231

```

Figura 4.12. Parámetros de la función de distribución *Inverse Gaussian* obtenida con *dffitool*

En el anexo D.4 se presentan los diferentes parámetros que definen las PDFs encontradas en el presente estudio y que son utilizados en las Tabla 4.2 y Tabla 4.3 .

A continuación, en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de las PDF que describen el comportamiento de cada tipo de *slice*, video y audio, para el tamaño y tiempo relativo entre *slices*, de las 4 categorías de vídeos (entrevista: categoría A, dibujos animados: categoría B y D, partido de fútbol: categoría C y película: Categoría E) utilizadas en todos los escenarios de experimentación seleccionados (escenario 1: UE se encuentra estático a una distancia de 30 m del eNB, escenario 2, 3 y 4: UE se aleja del eNB con velocidades de 1, 2 y 3 mps, en una dirección $y=x$; y escenario 5: UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria).

Esc.	Cat. Video	PDF I	PDF P	PDF Audio
1	A	$\log\text{Lpdf}(x, 6.61739, 0.00329778)$ D= 0.1697	$\text{wblpdf}(x, 174806, 5.05487)$ D= 0.0682	$\log\text{pdf}(x, 81669.5, 10730.6)$ D = 0.0733
	B y D	$\text{tlspdf}(x, 289580, 14004.1, 2.10368)$ D = 0.1754	$\text{normpdf}(x, 43370.1, 180567)$ D= 0.0789	$\text{evpdf}(x, 1662.36, 149.224)$ D = 0.02259
	C	$\text{evpdf}(x, 164886, 17471.6)$ D = 0.1355	$\text{wblpdf}(x, 109828, 6.54957)$ D = 0.0884	$\text{sblpdf}(x, 0.660443, 0.367676, 64.5148, 1547.7)$ D = 0.01817
	E	$\text{normpdf}(x, 94504.1, 17939.1)$ D = 0.0436	$\text{gevpdf}(x, 5068.72, 136880)$ D = 0.2392	$\log\text{pdf}(x, 1580.03, 85.7946)$ D = 0.02146
2	A	$\log\text{pdf}(x, 747.977, 2.49471)$ D= 0.1723	$\log\text{pdf}(x, 156675, 21441.5)$ D = 0.0774	$\text{gevpdf}(x, -0.394584, 195.314, 1534.98)$ D = 0.02544
	B y D	$\text{nakpdf}(x, 18.9699, 9.40673)$ D = 0.1345	$\text{ricpdf}(x, 180069, 38366.8)$ D = 0.0573	$\log\text{pdf}(x, 1573.24, 83.5492)$ D = 0.01717
	C	$\text{evpdf}(x, 101217, 65510.5)$ D = 0.1251	$\text{bspdf}(x, 99134.9, 0.175149)$ D = 0.0751	$\text{tlspdf}(x, 1548.31, 41.4081, 1.38915)$ D = 0.01656
	E	$\text{nakpdf}(x, 7.79266, 102403)$ D = 0.0612	$\text{gevpdf}(x, -0.226822, 6219.98, 144528)$ D = 0.2185	$\log\text{pdf}(x, 1583.14, 92.3756)$ D = 0.02390
3	A	$\text{wblpdf}(x, 749.614, 1276.56)$ D = 0.2272	$\text{evpdf}(x, 178374, 38897.7)$ D = 0.0661	$\text{ricpdf}(1585.31, 176.483)$ D = 0.02357
	B y D	$\text{igpdf}(x, 302550, 3.12167)$ D = 0.1535	$\text{igpdf}(x, 189547, 3.76263)$ D = 0.0731	$\log\text{pdf}(x, 1569.12, 78.5542)$ D = 0.02314

	C	evpdf(x, 156931, 13736) D = 0.1405	wblpdf(x, 102749, 6.55645) D = 0.0781	tlspdf(x, 1549.17, 34.561, 1.7167) D = 0.02436
	E	gevpdf(x, -0.582838, 22267.5, 92197.7) D = 0.0209	evpdf(x, 153810, 6038.86) D = 0.2057	logpdf(x, 1581.57, 91.8112) D = 0.1735
	A	wblpdf(x, 749.52, 1098.41) D = 0.2370	logpdf(x, 150553, 19685.1) D = 0.0634	ricpdf(1586.53, 170.343) D = 0.02338
4	B y D	nakpdf(x, 136.718, 8.04495) D = 0.1978	evpdf(x, 208111, 34260.3) D = 0.0746	wblpdf(x, 1640.76, 10.4471) D = 0.02136
	C	logpdf(x, 52398.5, 36906) D = 0.1150	bspdf(x, 94934.9, 0.180549) D = 0.0741	tlspdf(x, 1553.72, 33.8986, 1.48929) D = 0.09316
	E	lognpdf(x, 11.489, 0.182723) D = 0.0555	wblpdf(x, 136581, 44.5408) D = 0.2433	logpdf(x, 1577.88, 90.6407) D = 0.02418
5	A	wblpdf(x, 749.638, 1200.59) D = 0.1928	evpdf(x, 177815, 42231.3) D = 0.0650	ricpdf(x, 1589.22, 175.14) D = 0.02345
	B y D	evpdf(x, 289061, 11910.9) D = 0.1715	gevpdf(x, -0.466414, 42209.4, 179640) D = 0.0718	logpdf(x, 1574.92, 82.6043) D = 0.01689
	C	evpdf(x, 161471, 15329.2) D = 0.1290	bspdf(x, 97137.1, 0.18759) D = 0.0835	tlspdf(x, 1542.92, 44.6058, 1.2018) D = 0.02326
	E	gampdf(x, 28.9585, 3472.41) D = 0.0703	gevpdf(x, 0.205751, 1716.02, 133083) D = 0.2543	tlspdf(x, 1539.41, 52.6267, 1.03931) D = 0.02273

Tabla 4.2. PDF para para el tamaño de slice de diferentes categorías y escenarios de prueba

Esc.	Cat.	PDF I	PDF P	PDF Audio
1	A	normpdf(x, 3.04151, 0.579948) D = 0.0760	evpdf(x, 0.575861, 0.32636) D = 0.1204	normpdf(x, 4.98928e-05, 2.04313e-05) D = 0.0226
	B y D	ricpdf(x, 2.98132, 0.598063) D = 0.0748	evpdf(x, 0.597608, 0.313581) D = 0.1223	gevpdf(x, -0.0874135, 2.3439e-05, 4.06598e-05) D = 0.02245
	C	ricpdf(x, 2.94971, 0.58046) D = 0.1330	evpdf(x, 0.570071, 0.363482) D = 0.1309	logpdf(x, 5.29828e-05, 1.24337e-05) D = 0.02106
	E	ricpdf(x, 3.01304, 0.603692) D = 0.0750	evpdf(x, 0.573382, 0.306633) D = 0.1304	sbpdf(x, 1.18627, -0.422653, 8.01472e-06, 5.72301e-05)

			D = 0.02188
	A	normpdf(x, 3.02754, 0.573583) D = 0.0718	logpdf(x, 0.463678, 0.201116) D = 0.0756
			logpdf(x, 5.37621e-05, 1.04931e-05) D = 0.02441
2	B y D	logpdf(x, 2.94899, 0.377475) D = 0.07566	evpdf(x, 0.580057, 0.291987) D = 0.1216
			ricpdf(x, 4.50961e-05, 2.01485e-05) D = 0.01199
	C	normpdf(x, 3.03274, 0.560896) D = 0.1311	evpdf(x, 0.0256111, 0.0429848) D = 0.02061
			sblpdf(x, 1.10562, - 0.374936, 7.45368e- 06, 5.67975e-05) D = 0.02635
	E	ricpdf(x, 3.01304, 0.603692) D = 0.1210	evpdf(x, 0.453385, 0.363379) D = 0.1521
			logpdf(x, 5.43433e-05, 1.06324e-05) D = 0.02412
	A	ricpdf(x, 2.97072, 0.578128) D = 0.0718	evpdf(x, 0.634157, 0.310141) D = 0.1308
			sblpdf(x, 1.21001, - 0.460126, 8.67883e- 06, 5.67542e-05) D = 0.02395
3	B y D	normpdf(x, 3.06832, 0.54597) D = 0.0802	evpdf(x, 0.599063, 0.327254) D = 0.1223
			sblpdf(x, 1.14607, - 0.452062, 9.96966e- 06, 5.38393e-05) D = 0.01650
	C	ricpdf(x, 2.8844, 0.604877) D = 0.0718	evpdf(x, 0.45935, 0.313379) D = 0.1340
			sblpdf(x, 0.917028, - 0.198, 6.99932e-06, 5.45389e-05) D = 0.02437
	E	ricpdf(x, 2.91076, 0.606291) D = 0.0718	evpdf(x, 0.453385, 0.363379) D = 0.1521
			wblpdf(x, 5.66215e- 05, 2.84341) D = 0.02590
	A	ricpdf(3.05515, 0.543689) D = 0.0750	evpdf(x, 0.646653, 0.332341) D = 0.1152
			logpdf(x, 5.36445e-05, 1.10432e-05) D = 0.02264
4	B y D	normpdf(x, 3.01676, 0.582742) D = 0.0762	evpdf(x, 0.57168, 0.295165) D = 0.1323
			wblpdf(x, 5.79899e- 05, 2.21516) D = 0.02337
	C	logpdf(x, 2.94427, 0.365664) D = 0.0721	evpdf(x, 0.467442, 0.352899) D = 0.1493
			evpdf(x, 6.59684e-05, 3.56448e-05) D = 0.09331
	E	ricpdf(x, 3.01699, 0.559062) D = 0.1468	evpdf(x, 0.395388, 0.313032) D = 0.1860
			normpdf(x, 5.22776e- 05, 2.031e-05) D = 0.02512
	A	ricpdf(3.01304, 0.603692) D = 0.0751	evpdf(x, 0.573382, 0.306633) D = 0.1294
			ricpdf(x, 4.60229e-05, 2.20583e-05) D = 0.02408

5	B y D	ricpdf(x, 2.92523, 0.581191) D = 0.1329	logpdf(x, 0.418901, 0.216675) D = 0.1330	logpdf(x, 5.27064e-05, 1.09349e-05) D = 0.02406
	C	logpdf(x, 2.94427, 0.365664) D = 0.0716	evpdf(x, 0.467442, 0.352899) D = 0.0723	logpdf(x, 5.40897e-05, 1.08668e-05) D = 0.02068
	E	normpdf(x, 3.00284, 0.565114) D = 0.0714	evpdf(x, 0.344883, 0.27107) D = 0.1714	sbldpdf(x, 1.187, - 0.373033, 8.51082e- 06, 5.69423e-05) D = 0.02324

Tabla 4.3. PDF para el tiempo relativo entre slices de diferentes categorías y escenarios de prueba

Se aprecia en el modelo estadístico realizado que, para los *slices* de video, solo se detecta GOP tipo I y P.

4.4 Conclusiones preliminares

De acuerdo a los resultados obtenidos, y para las condiciones preestablecidas en los diferentes escenarios de experimentación estudiados, para la implementación del servicio de LVS en una red LTE, se pueden hacer las siguientes apreciaciones:

- Se ha realizado un modelado estadístico de tráfico de las componentes de audio y video que conforman el servicio de LVS de una red LTE emulada. El modelo construido se desarrolla a partir de trazas de tráfico reales y con escenarios de emulación.
- Se observa que el modelado del tráfico del servicio de LVS realizado, presenta una descripción muy particular para cada uno de los escenarios de prueba definidos. De lo anterior se puede afirmar que el modelo encontrado depende de las condiciones propias de cada escenario y que no existe un modelo único que describa el comportamiento general de tráfico para el servicio de LVS en una red LTE emulada.
- A partir de los modelos de tráfico del servicio de LVS en redes LTE encontrados para cada escenario emulado en particular, es posible utilizar las PDF construidas del servicio de LVS en redes LTE para generar tráfico en sistemas de simulaciones

que conduzcan a validar otros parámetros para este tipo de redes, tales como número de usuarios, estudio de interferencia, desempeño de planeadores de recursos, gestión de potencia, etc., ya que se parte de un modelo validado y que presenta un comportamiento estadísticamente equivalente con un sistema real.

- El modelo de tráfico para el servicio LVS en redes LTE y para los entornos de experimentación estudiados en esta tesis doctoral, es una herramienta que le permitirá, a los diseñadores y planificadores de redes, tener más insumos para realizar un análisis de funcionamiento enfocado a parámetros de QoS, a partir de los cuales se puedan tomar decisiones de redimensionamiento de los recursos asignados a las redes actuales LTE, con lo cual se garantiza a los usuarios finales del servicio, obtener un mayor grado de satisfacción.

Capítulo Quinto

5. Medición de la Calidad de la Experiencia–QoE

En este capítulo se presenta la forma como se evalúa la QoE (objetiva y subjetiva) para el servicio LVS en una red LTE emulada. Se identifican los diferentes KPIs de QoE, entre los cuales se tienen: cantidad y duración de eventos de *stalling* y duración del búfer, para los diferentes escenarios de experimentación propuestos; además de realiza la comparación de QoE y KPIs de QoE con parámetros de QoS tales como: *packet loss*, *jitter*, *throughput* e *interpacket delay*. Adicionalmente, se compara mediante la estimación de la QoE y KPIs de QoE el comportamiento de las diferentes técnicas de *streaming adaptativo* cuando se utiliza el servicio de LVS en una red LTE emulada.

Para realizar las estimaciones de la QoE objetiva, se presenta una herramienta desarrollada en este trabajo de doctorado en *Matlab*. Adicionalmente, para validar la herramienta presentada, se realiza la comparación con un caso de evaluación de la QoE subjetiva realizada con 40 usuarios en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad del Quindío. Finalmente se presenta los resultados obtenidos de la comparación de las diferentes técnicas de *streamig* adaptativo en diferentes escenarios de prueba.

La metodología de evaluación está basada en la recomendación ITU-T P.1203, la cual describe los algoritmos para monitorear de forma integral la calidad multimedia de sesiones de transmisión de video basados en TCP.

5.1. Metodologías para medición de la QoE

Para la evaluación de la QoE, primero se debe establecer el tipo de estimación que se quiere realizar: objetiva o subjetiva, ver sección 2.2.1. Para la medición objetiva, en este trabajo se utiliza la recomendación ITU-T P.1203, debido a que esta se centra en la evaluación de la calidad paramétrica basada en flujos de bits de descargas progresivas y servicios de transmisión audiovisual adaptativa a través de un transporte fiable, la cual se ajusta a la técnica de *Streaming* adaptativo DASH utilizada por LTE. Adicionalmente, la recomendación ITU-T P.1203, es una de las primeras metodologías que incorporan técnicas de *Machine Learning* para la predicción de la QoE. Por otro lado, para estimar la QoE de manera subjetiva, se utilizan las recomendaciones ITU-R BT.500-13 [122], ITU-T P.910 [39] y ITU-T P.913 [123], las cuales definen metodologías para el desarrollo de experimentos subjetivos.

5.2 Estimación de la QoE Objetiva

Para el proceso de estimación de la QoE a partir de la norma ITU-T P.1203, es necesario crear una herramienta software que permitiera realizar esta labor, esta herramienta se crea en Matlab y se describe su funcionamiento en una sección posterior.

5.2.1 Recomendación ITU.T – P1203 [19]

La recomendación ITU-T P.1203 proporciona el documento introductorio para un conjunto de recomendaciones adicionales de la ITU-T que describen los algoritmos para monitorear de forma integral la calidad multimedia de sesiones de transmisión de video basados en TCP. Es decir, esta recomendación desarrolla una evaluación de calidad paramétrica basada en flujos de bits de descarga progresiva y servicios de transmisión audiovisual adaptativos sobre transporte fiable. Dependiendo del número y tipo de los parámetros inspeccionados y la complejidad del algoritmo de

procesamiento, la Rec. ITU-T P.1203, presenta 4 modos diferentes de operación, estos son definidos como:

- *Modo 0*: la información se obtiene de los metadatos disponibles durante la descarga progresiva o la transmisión adaptativa con respecto al códec y la velocidad de bits, el retraso de carga inicial y los eventos de bloqueo (*stalling*). Los metadatos, para obtener dicha información, se puede extraer de los archivos de manifiesto utilizados en DASH.
- *Modo 1*: se considera toda la información del *Modo 0*, con información adicional de trama de video y audio basada en la inspección del encabezado del paquete.
- *Modo 2*: a partir de la información considerada en el *Modo 1* y hasta el 2% (en bytes) de la información general del flujo multimedia basada en la inspección profunda de paquetes y el análisis parcial del flujo de bits.
- *Modo 3*: toda la información empleada en el *Modo 1* y la información completa del flujo de multimedia basada en el análisis de flujo de bits

La recomendación ITU-T Rec. P.1203 predice la QoE en términos de la MOS [40] en una escala de calificación de índices de categoría absoluta (ACR) de 5 puntos [39]. Además, los módulos independientes proporcionan varias salidas de diagnóstico, que se describen en [19]. La Figura 5.1 muestra los diferentes módulos del modelo ITU-T P.1203.

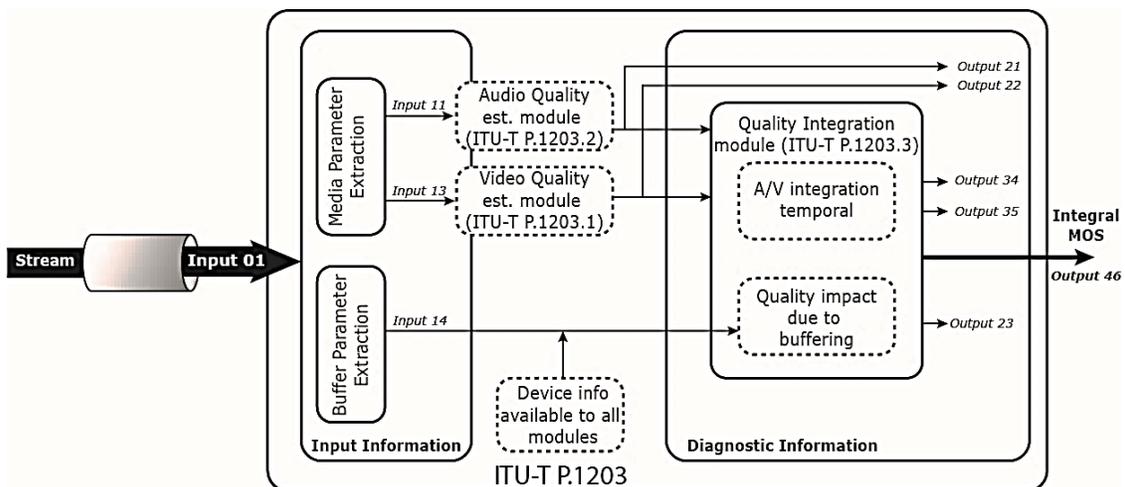


Figura 5.1. Módulos de la ITU-T P.1203 [18] (I=Input; O=Output)

Como se observa en la Figura 5.1, el modelo P.1203 consta de un módulo de estimación de calidad de audio (*Audio quality estimation module*) P_a definido por la

recomendación ITU-T P.1203.2 [124], un módulo de estimación de calidad de vídeo (*Video quality estimation module*) P_v definido por la recomendación ITI-T P.1203.1 [29] y un módulo de integración de calidad audiovisual (*Quality integration module*) P_q definido por la recomendación ITU-T P.1203.3 [125]. Los módulos P_a y P_v operan en el nivel del flujo de bit en forma de ventana deslizante para sesiones de 20 segundos. Para considerar esta situación, en el *script* diseñado existe un *timer* de 20 segundos, el cual realiza promedio con las resoluciones tomadas durante ese periodo. En el Anexo F.1 se presenta una descripción de los módulos enunciados y de las diferentes entradas I y salidas O del modelo.

Es importante aclarar que para utilizar el módulo de integración de calidad P_q , es decir, la recomendación ITU-T P.1203.3, es necesario cumplir con ciertos factores y rangos de aplicaciones resumidos en la Tabla 5.1.

Duración de secuencia de video	60 segundos – 5 minutos
Retardo de carga inicial y <i>stalling</i>	0-10 segundos
Nro. máximo de eventos de <i>stalling</i>	5
Longitud máxima de un evento de <i>stalling</i> simple	15 segundos
Duración total de <i>stalling</i>	30 segundos
Otros detalles	Sin eventos de <i>stalling</i> durante 5 segundos de inicio de la reproducción del video.

Tabla 5.1. Factores y rangos de aplicación del estándar UIT-T P.1203.3

5.2.2 Herramienta Software diseñada para la medición de la QoE

De acuerdo a la recomendación de la UIT-T que se aplica en esta investigación, se desarrolla una implementación funcional del modelo P.1203 con el objetivo de evaluar la QoE en términos de la *MOS*, la cual es utilizada para estimar la QoE del servicio de LVS en una red LTE. El algoritmo desarrollado, y que se muestra en la Figura 5.2, calcula el valor *MOS* estimado de una sesión dada de acuerdo con el número y la duración de los eventos de *stalling*, así como el tiempo total de reproducción del vídeo

y otros parámetros definidos por la recomendación. El algoritmo desarrollado incluye el proceso implementado para todas las pruebas bajo estudio. Desde <http://www.gituq.edu.co/RS.html> se puede descargar el *script* implementado en Matlab del algoritmo presentado.

Algoritmo: Estimación de MOS a partir de la recomendación ITU-T P.1203 para diferentes escenarios de experimentación, protocolos y resoluciones.

Input: Constants and Stalling events

Output: $MOS_{estimation}$

1: **Constant definition**

2: **Read Stalling events parameters**

$Events_{time-stamp}$, $Events_{length}$, $Events_{number}$, $Playback_{length}$

3: **O21 & O22 estimation**

According to:

3.1. Audio & Video bit-rate

3.2. Emission & Reception codification

4: **RF_{parameters}**

for each scenario do

for each protocol do

for each test do

$avgBuffInterval$, $totalBuffLen$, $O34$, $RF_{parameters(1-14)}$ estimation

end test for

end protocol for

end scenarios for

5: **RF_{prediction}**

for each scenario do

for each protocol do

for each test do

Obtain $RF_{prediction}$ per-tree value using *RandomForest*

end test for

$RF_{prediction} = \text{mean}(RF_{prediction \text{ per-tree}})$

end protocol for

end scenarios for

6: **MOS_{estimation}**

for each scenario do

for each protocol do

for each test do

$O35$, $O23$, $vidQualChangeRate$, and $O46$ estimation

end test for

$MOS_{estimation} = \text{mean}(O46_{per-test})$

end protocol for

end scenarios for

7: **Result Representation**

Figura 5.2. Algoritmo implementado para aplicar el modelo ITU-T P.1203

Como se observa en la Figura 5.2, en el algoritmo primero se declaran todas las variables definidas en la recomendación, las cuales son utilizadas para calcular los

parámetros finales e intermedios. En esta línea, la Rec. UIT-T. P.1203.1 [29] define todas las constantes y variables para la estimación de calidad de video, la Rec. UIT-T. P.1203.2 [124] se centra en aquellos para la estimación de calidad de audio y, finalmente, la Rec. UIT-T. P.1203.3 [125] incluye recursos de integración de puntaje multimedia y final para sesiones entre 30 segundos y 5 minutos. En esta parte del *script* se definen los diferentes valores de resolución por segmentos de 20 segundos durante la reproducción del vídeo.

A continuación, el algoritmo carga los parámetros de los eventos de *stalling*, tales como $Event_{time-stamp}$, el cual indica cuándo comienza un evento determinado, $Event_{length}$, que indica cuánto dura el evento, $Events_{number}$, que contiene el número de eventos durante la reproducción y $Playback_{length}$ que contiene la duración total de la reproducción. A lo largo del código, estos parámetros se usan varias veces porque son clave para estimar otras variables finales o intermedias. Es importante observar que los eventos de *stalling* son métricas clave de rendimiento – KPI al medir la QoE [9] [28] [52].

En la fase 3 del Algoritmo, entran en juego los bloques de procesamiento para estimar los diferentes tipos de estimaciones de calidad. Se calcula el parámetro $O.21$, que es la calidad de audio por intervalo de muestreo de salida en la escala *MOS*, así como la salida $O.22$, que es el equivalente para la calidad de video usando también la escala *MOS*. Dependiendo del tipo de *streaming* (descarga progresiva o adaptativo) se utilizan diferentes constantes: velocidad de bits de audio, que es el espacio de memoria requerido para almacenar un segundo de audio, velocidad de bit de video, que corresponde a la información que se reproduce por segundo, la codificación de emisión, que convierte la información para enviarla al receptor, la codificación de recepción, que traduce el mensaje recibido y lo adapta para reproducirlo, y finalmente la velocidad de fotogramas, que es el número de fotogramas por segundo en el video.

En el siguiente paso se realiza el cálculo de un conjunto de variables intermedias utilizando la información de los eventos de *stalling* y las constantes definidas en la Rec. UIT-T. P.1203. Estas variables se obtienen para cada prueba, protocolo y escenario. En particular, las variables son: $avgBuffInterval$, que es el intervalo promedio entre eventos de bloqueo, $totalBuffLen$, que es la duración total de los eventos de *stalling* teniendo en cuenta el peso del búfer, $O.34$, que es la calidad audiovisual por intervalo de muestreo de salida y que depende de $O.21$ y $O.22$ y 14 parámetros de RF (*Random*

Forest). A continuación en la tabla Tabla 5.2, se describen los parámetros de RF, los cuales se encuentran definidos en la sección 8.1.3 de [125].

Parámetro	Nombre	Descripción
0	<i>stallCountWithoutInitial</i>	Número total de eventos de <i>stalling</i> que ocurren en la sesión multimedia, excluyendo el evento de <i>stalling</i> inicial.
1	<i>stallDur</i>	Esta es la suma de la duración de todos los eventos de <i>stalling</i> .
2	<i>stallFreq</i>	Número de eventos de <i>stalling</i> divididos por la duración multimedia.
3	<i>stallRatio</i>	Relación entre la duración total de los eventos de <i>stalling</i> y la longitud total multimedia.
4	<i>timeLastStallToEnd</i>	Tiempo transcurrido desde el inicio de la ocurrencia del último evento <i>stalling</i> hasta el final del video.
5	<i>averagePvScoreOne</i>	Promedio de todas las puntuaciones <i>O.22</i> que corresponden al primer tercio de los valores del vector <i>O.22</i> .
6	<i>averagePvScoreTwo</i>	Promedio de todos los puntajes <i>O.22</i> del segundo tercio de los valores del vector <i>O.22</i> .
7	<i>averagePvScoreThree</i>	Promedio de todos los puntajes <i>O.22</i> del tercer tercio de los valores del vector <i>O.22</i> .
8	<i>1PercentilePvScore</i>	1° percentil de <i>O.22</i> .
9	<i>5PercentilePvScore</i>	5°to percentil de <i>O.22</i> .
10	<i>10PercentilePvScore</i>	10° percentil de <i>O.22</i> .
11	<i>averagePaScoreOne</i>	Promedio de puntajes <i>O.21</i> en la primera mitad del vector de puntaje <i>O.21</i> .
12	<i>averagePaScoreTwo</i>	Promedio de puntajes <i>O.21</i> en la segunda mitad del vector de puntaje <i>O.21</i> .
13	<i>T</i>	Longitud del video multimedia

Tabla 5.2. Parámetros RF relacionados con el módulo de machine learning

Una vez se calculan $RF_{parameters}$ se aplica el modelo ITU-T P.1203.3, se extrae el valor $RF_{prediction}$. $RF_{prediction}$ se obtiene de un algoritmo de aprendizaje automático supervisado particular, llamado *Random Forest*. El modelo RF, incluido en la recomendación, tiene 20 árboles, donde cada árbol tiene una profundidad máxima de 6. Cada fila del árbol tiene 5 parámetros de información: *nodeID*, *featureID*, *feature threshold*, *left child nodeID*, and *right child nodeID*. Cada árbol de decisión comienza en el nodo 0 comparando el *featureID* ($\mathbb{Z} \in [1,14]$) con el $RF_{parameter}$. Si $RF_{parameter}$ está por debajo del umbral de la función en el nodo correspondiente, se mueve al nodo *left child nodeID*. Por el contrario, si $RF_{parameter}$ está por encima del umbral de la característica, se mueve al nodo *right child nodeID*. El proceso continúa hasta alcanzar un valor *featureID* de -1, lo que indica que el nodo actual es un nodo hoja y se alcanza.

El valor umbral de la característica de un nodo hoja es $RF_{prediction}$ para este árbol de decisión particular. El valor final de $RF_{prediction}$ para una prueba es la media de las salidas de los 20 árboles.

Por último, en el proceso del cálculo de la $MOS_{estimation}$, para estimar el puntaje de calidad final, se utiliza nuevamente los parámetros de eventos de *stalling*, las constantes proporcionadas previamente y el valor $RF_{prediction}$ obtenido. Algunos valores intermedios también son necesarios (como se explicó anteriormente): 0.35, que es la calidad final de codificación audiovisual, 0.23, que es un indicador de pérdida perceptual, *vidQualChangeRate*, que es la diferencia entre el puntaje de calidad de video máximo y mínimo dentro de 0.22. 0.46_{per-test} corresponde al puntaje de calidad de sesión de multimedia obtenido por prueba o test, se aclara que para cada estimación de la $MOS_{estimation}$, en los diferentes escenarios y protocolos se repite el experimento 10 veces (10 pruebas o *test*). El valor final de $MOS_{estimation}$ se calcula para cada protocolo, en cada escenario, como la media de todos los valores de 0.46_{per-test} para todas las pruebas.

5.2.3 Extracción de parámetros de búfer

Uno de los desafíos más importantes para aplicar la Rec. UIT-T P.1203 es cómo extraer de los parámetros de búfer, y cuya metodología no se encuentra definida en la recomendación. El objetivo de este módulo es generar la entrada *I.14* (ver Figura 5.1), cuyos parámetros considerados son: inicio del evento de *stalling*, carga inicial y duración del evento [28], [52]. Para cada transmisión de video, se crea un archivo de eventos de *stalling* con la estructura que se muestra en la Tabla 5.3. Cada fila indica el tiempo de inicio de un evento y su duración. Particularmente para este ejemplo, hay 6.17 segundos de búfer inicial, un primer evento de *stalling* de 5.42 segundos de duración ocurre a los 85.39 segundos de reproducción del vídeo; un segundo evento de *stalling*, que dura 3.12 segundos ocurre a los 137.18 segundos del tiempo de reproducción del vídeo. Finalmente, al final de la columna 3 se muestra el tiempo total de reproducción.

Tiempo de evento	Duración de evento	T _{Reproducción}	Descripción
0.00	6.17		Búfer inicial

85.39	5.42	Evento de <i>Stalling</i>
137.18	3.12	Evento de <i>Stalling</i>
	180	Tiempo Total reproducción

Tabla 5.3. Ejemplo de archivo de eventos de stalling

A partir, de los archivos de eventos de *stalling* recopilados, se calculan las 14 características ($RF_{parameters}$), de los cuales se obtiene el factor de $RF_{prediction}$ al aplicar el modelo de *machine learnig- Random Forest* (descrito en la sección anterior). Las actividades anteriores se realizan con la ayuda de la herramienta software diseñada para la medición de la QoE. Como ejemplo, la Tabla 5.4 muestra los $RF_{parameters}$ y la $RF_{prediction}$ calculados para las 10 repeticiones de uno de los experimentos.

5.2.4 Estimación de la QoE objetiva en los diferentes escenarios de experimentación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al estimar la QoE objetiva mediante el uso del software diseñado a partir de la recomendación ITU-T P.1203 para servicios que utilizan protocolos de transporte fiables con técnicas de streaming tanto progresivas como adaptativas. Se realiza la estimación de la QoE del servicio de LVS en una red móvil inalámbrica LTE; la cual se implementa en los dos escenarios de experimentación planteados: uno real y otro emulado, los cuales fueron descritos en el capítulo 3, ambas estimaciones se calculan para un ambiente *outdoor*. Se realizan dos tipos de mediciones de la QoE objetiva. La primera, en la cual, para ambos escenarios, se utiliza el servicio LVS con la técnica de descarga progresiva RTMP (*Real-Time Messaging Protocol*) y la técnica de descarga adaptativa DASH (*Dynamic Adaptive Streaming over HTTP*); ambos protocolos emplean TCP como el protocolo fiable de la capa de transporte. El objetivo principal de esta actividad es validar mediante parámetros de QoE la configuración del modelo de propagación más apropiado que se pueda utilizar en una red LTE emulada, y que permita obtener resultados fiables al ser comparado con el escenario real. Estos resultados complementan la validación de los escenarios de experimentación presentada en la sección 3.3, los cuales se realizaron a través de parámetros de QoS. En las segundas mediciones, se estima la QoE objetiva para el servicio de LVS utilizando diferentes técnicas de *streaming* adaptativo, a saber: DASH, HLS, HDS y HSS. El objetivo de esta actividad se enfoca en el estudio del rendimiento de las diferentes técnicas de

Parámetro	Nombre	Test1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10
0	<i>stallCountWithoutInitial</i>	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
1	<i>stallDur</i>	1.333	1.333	3.333	3.333	3.333	1.333	1.333	3.333	3.333	3.333
2	<i>stallFreq</i>	0.007	0.008	0.014	0.008	0.008	0.007	0.008	0.014	0.008	0.008
3	<i>stallRatio</i>	0.009	0.010	0.024	0.025	0.025	0.009	0.010	0.024	0.025	0.025
4	<i>timeLastStallToEnd</i>	120	118	55	123	123	120	118	55	123	123
5	<i>averagePvScoreOne</i>	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915
6	<i>averagePvScoreTwo</i>	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915
7	<i>averagePvScoreThree</i>	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915	3.471	3.944	3.719	3.915	3.915
8	<i>1PercentilePvScore</i>	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339
9	<i>5PercentilePvScore</i>	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339
10	<i>10PercentilePvScore</i>	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339	4.339
11	<i>averagePaScoreOne</i>	3.647	4.145	3.908	4.114	4.114	3.647	4.145	3.908	4.114	4.114
12	<i>averagePaScoreTwo</i>	4.863	5.526	5.211	5.485	5.485	4.863	5.526	5.211	5.485	5.485
13	<i>T</i>	180	177	182	183	178	180	178	179	180	181
RF Prediction Factor		4.471	4.503	4.296	4.370	4.370	4.471	4.503	4.296	4.370	4.370

Tabla 5.4. Ejemplo de calculo de factores de $RF_{parameters}$ y $RF_{prediction}$

streaming adaptativas de video cuando se emplean en una infraestructura 4G emulada. En el estudio de rendimiento se utilizan métricas de QoE y QoS. En todos los experimentos realizados, se utiliza una secuencia de vídeo codificada en H.264 de 180 segundos de duración, la cual es extraída de la conocida película de dibujos animados "*Big Buck Bunny*" [110], con las configuraciones propias para cada tipo de medición. Los experimentos (test) se repiten 10 veces con el fin de evitar singularidades inesperadas. Finalmente, al extraer las métricas necesarias de eventos de *stalling* de los diferentes test, se aplica el modelo ITU-T P.1203 implementado en Matlab para estimar la QoE en términos de MOS para cada transmisión de video. La Tabla 3.6 y la Tabla 3.7 presentan los parámetros de configuración técnica para cada uno de los bancos de pruebas considerados.

5.2.4.1 QoE Objetiva para protocolo RTMP y DASH

La Figura 5.3 y la Figura 5.4 muestran la estimación de la QoE en términos de la *MOS* obtenida aplicando la Rec. UIT-T. P.1203. Estas cifras de QoE, corresponde a la salida 0.46, de acuerdo a la ecuación (F.21), para los dos bancos de prueba diferentes (sistema LTE real y emulado), empleando los protocolos RTMP y DASH con dos resoluciones diferentes, 480p y 720p, y modelo de propagación (*Nakagami-m* con m igual a 0.5, 1, 3, 5, 7 e HybridBuildings). Las resoluciones utilizadas y los modelos de propagación empleados, fueron seleccionados, de acuerdo a los resultados obtenidos de la sección 3.3. Los gráficos de barras presentan los valores promedio y los intervalos de confianza ($\alpha = 0.05$) obtenidos para cada configuración, evitando así singularidades no representativas. A partir de estas cifras, se puede observar que el modelo de propagación que mejor se adapta al comportamiento del sistema en condiciones reales, en termino de parámetros de QoE, es el modelo *Nakagami-m*, con $m = 5$.

Los valores más bajos de m implican la mayoría de las condiciones adversas de propagación, como las de los ambientes interiores, y los valores más altos tienden a representar condiciones de espacio casi libre. Con respecto a la *MOS* obtenida con los protocolos, se observa en la Figura 5.3 como el protocolo *DASH* presenta valores *MOS* más altos que el protocolo *RTMP* en casi todas las condiciones estudiadas, especialmente con la resolución más alta. A su vez, se evidencia una disminución de la *MOS* en la Figura 5.4, cuando se usa la resolución más alta (720p) para ambos códecs. Esto se explica por el mayor volumen de datos transmitidos con resoluciones más altas que provoca degradaciones de la transmisión en forma de pérdida de

paquetes. Como se observará más adelante, la presencia de pérdidas conduce a un aumento en el número y la duración de los eventos de *stalling*, que tienen un gran peso en la estimación de QoE con la recomendación UIT-T. P.1203.

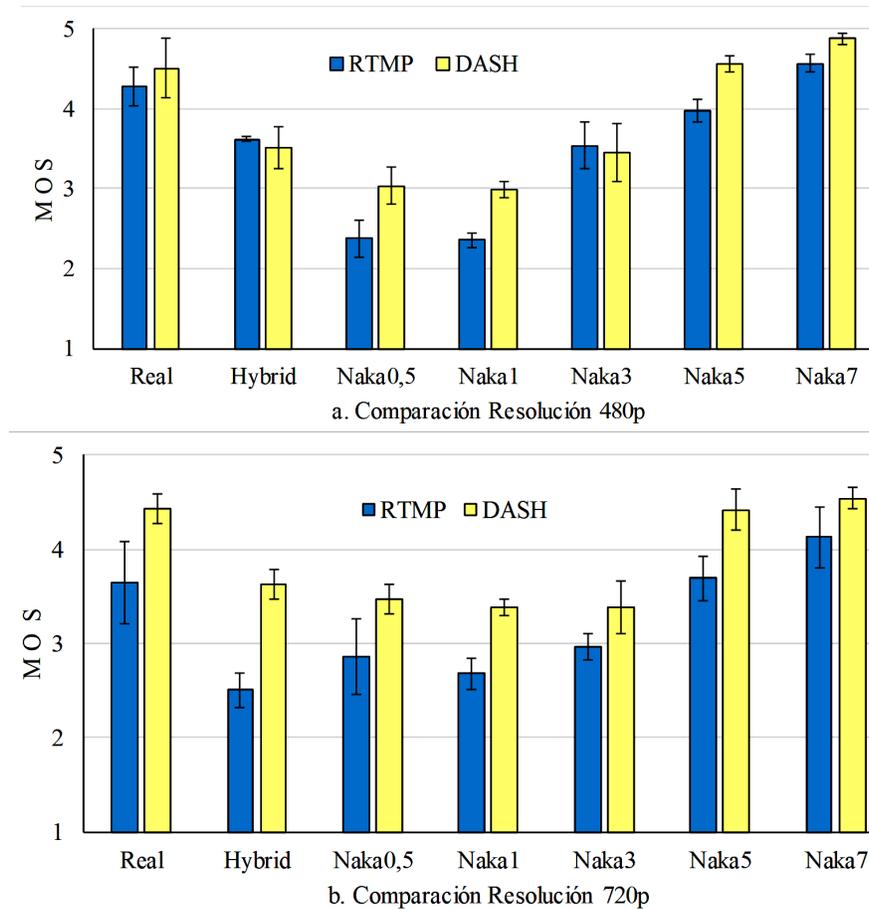


Figura 5.3. Estimación de QoE promedio utilizando la Rec. UIT-T Modelo P.1203 (incluidos los intervalos de confianza con $\alpha = 0.05$) para diferentes modelos de propagación, resoluciones y protocolos (a. 480 y b. 720)

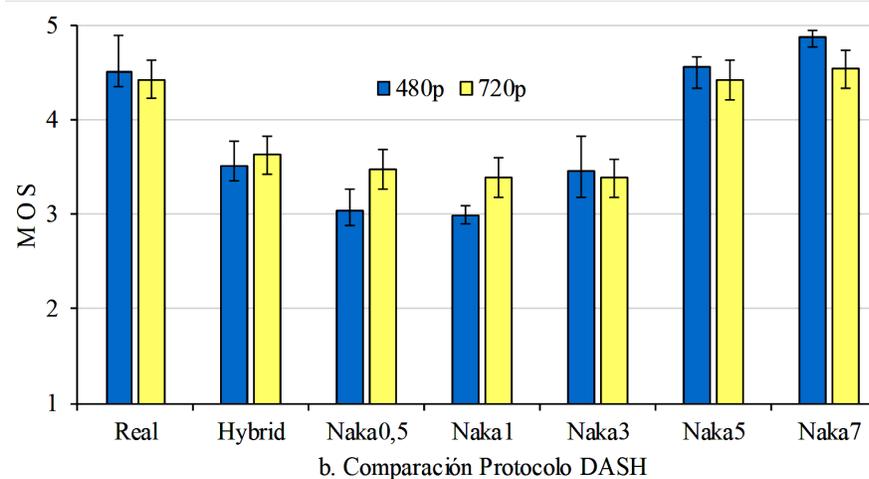
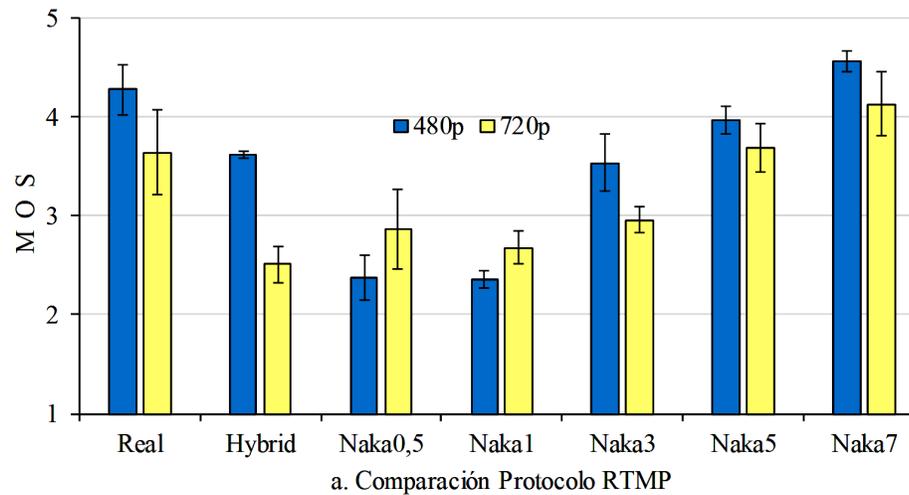
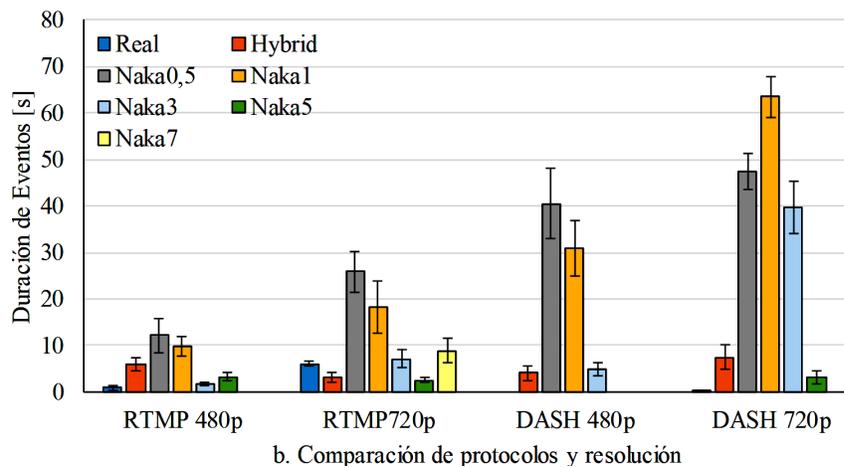
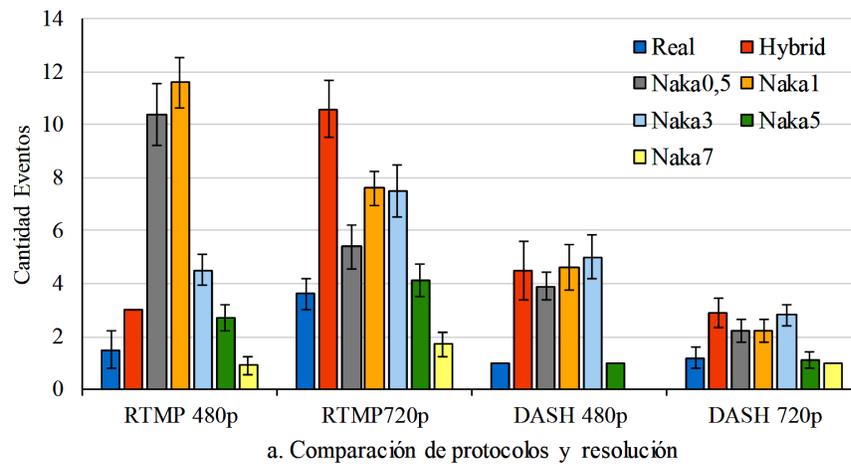


Figura 5.4. Estimación de QoE promedio utilizando la Rec. UIT-T Modelo P.1203 (incluidos los intervalos de confianza con $\alpha = 0.05$) para diferentes modelos de propagación, resoluciones y protocolos. (a. RTMP y b. DASH)

La Figura 5.5 presenta una comparación del número y la duración de los eventos de *stalling* con el valor de la QoE estimada. Primero, al comparar la Figura 5.5(a) y la Figura 5.5(c), se observa que un aumento en el número de eventos de *stalling* conduce a una disminución notable en los niveles de la *MOS*. Lo mismo se aplica a la duración de los eventos de *stalling* (ver Figura 5.5(b) y Figura 5.5(c)). En segundo lugar, el número de eventos de *stalling* es mayor para RTMP que para DASH (Figura 5.5(a)), lo que causa niveles más bajos de la *MOS* para RTMP como se discutió anteriormente. Por el contrario, la duración de los eventos de *stalling* es menor para el protocolo RTPM que para DASH (ver Figura 5.5(b)). De lo anterior, es evidente una relación directa entre el número y la duración de los eventos de *stalling* con el valor de *MOS*; Esta relación también se obtiene por *Seufert et al* [13]. Cuanto menor sea el número de

eventos de *stalling* y de menor duración, más alta será el valor de la MOS. Con una resolución de 480p usando el protocolo DASH y el modelo de propagación *Nakagami-m* ($m = 7$), no se detectaron eventos de *stalling*, como se esperaba para condiciones de propagación casi ideales. Por otro lado, la mayor cantidad de eventos de *stalling* y de mayor duración, se obtienen con los escenarios más adversos, es decir, aquellos caracterizados con el modelo de *Nakagami* con $m = 0,5$ y $m = 1$.



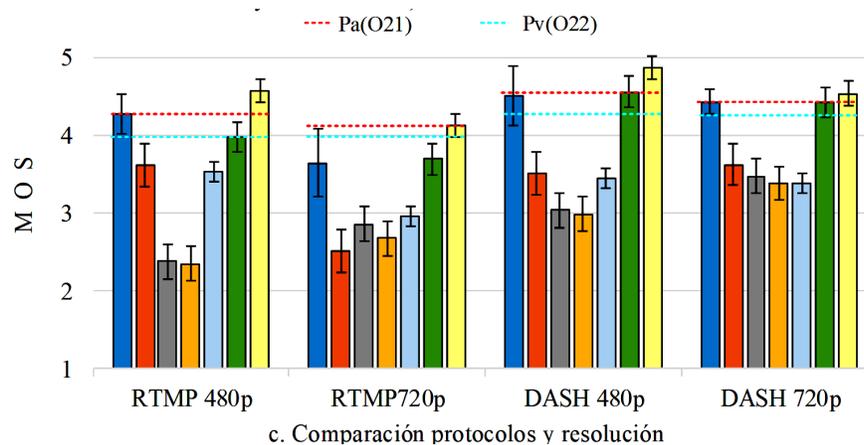


Figura 5.5. Comparación del número promedio de eventos de *stalling* y su duración (ambas métricas incluyen intervalos de confianza $\alpha = 0.05$) para el QoE-MOS (0.46), Pa (0.21) y Pv (0.22) obtenidos del ITU-T Rec. Modelo P.1203.

La Figura 5.5(c) también muestra el valor de dos resultados intermedios: 0.21 (calidad de audio por intervalo de muestreo de salida, Pa) y 0.22 (calidad de video por intervalo de muestreo de salida, Pv), ver Figura 5.1. Estos valores son importantes para el cálculo de la salida final (0.46, MOS integral) ya que son entradas claves del módulo de integración de calidad junto con la información de los eventos de *stalling* (1.14). Otros valores de salida como 0.34 (calidad de codificación del segmento audiovisual por intervalo de muestreo de salida) y 0.35 (puntuaje final de calidad de codificación audiovisual) también se derivan de 0.21, 0.22 e 1.14. Se observa que los valores para 0.21 y 0.22 se mantuvieron constantes a lo largo de los experimentos, ya que no dependen de las condiciones de transmisión sino solo de las características de codificación de video / audio (incluidas en la Tabla 3.7). Por lo tanto, teniendo en cuenta estos parámetros preliminares y de calidad constante, la evaluación de la MOS estimada final se determina básicamente por las condiciones de transmisión y por el efecto generado de los eventos de *stalling*, que se evidencian en el terminal del usuario.

Finalmente, se observa que el modelo de propagación probado en el banco de pruebas de emulación que mejor coincide con los resultados obtenidos en el banco de pruebas experimental (el escenario real) es *Nakagami-m* con $m = 5$. Este resultado corrobora los resultados anteriores presentados en la sección 3.3 con respecto a la configuración más adecuada de LTE en herramientas de emulación y publicado en [58]; donde los bancos de pruebas se validan a partir de parámetros de QoS, tales como: *Packet Loss*

Rate (PLR), Jitter, Interpacket delay y *Throughput*. De lo anterior, se puede afirmar que la plataforma presentada será útil en la realización de estudios, como la caracterización del tráfico para el servicio LVS en una red LTE, que ofrece un alto grado de confiabilidad debido a la precisión de la plataforma propuesta con el escenario real y mayor flexibilidad que las implementaciones reales.

5.2.4.2 Estudio de desempeño de las diferentes técnicas de Streaming adaptativo a partir de parámetros de QoS y QoE

En esta sección, se utiliza la herramienta de emulación presentada y validada, con el objetivo de estudiar el rendimiento de las diferentes técnicas de *streaming* adaptativas de video a saber: DASH, HLS, HDS y HSS; cuando se emplean en una infraestructura 4G. Este estudio se lleva a cabo desde una perspectiva de parámetros de QoS y QoE. Para la QoS, se utilizan métricas de *Packet Loss Rate (PLR), Jitter, Interpacket delay* y *Throughput*. Por otro lado, para la estimación de la QoE, se utiliza la Rec. UIT-T P.1203. En la estimación de la QoE y las métricas de QoS mencionadas, se utiliza un servicio de LVS que se consume a través de una conexión 4G de extremo a extremo emulada. Se han considerado varias condiciones de transmisión mediante la introducción artificial de distorsiones de red controladas para parámetros de QoS, tales como: *Packet Loss Rate (PLR)* y *Interpacket delay*. A partir de trabajos científicos, tales como [9], [28], [52], [80], [126], [127], entre otros, y de resultados obtenidos en esta investigación doctoral, los eventos de *stalling* y el tiempo de búfer inicial se identifican como los dos KPI con un fuerte efecto en la estimación de la QoE. Por lo tanto, en esta sección se estudia la relación de los parámetros de QoS mencionados y de los KPI con la QoE estimada por el modelo ITU-T P.1203.

Para evaluar el rendimiento del sistema en diversas situaciones realistas, se han considerado tres escenarios diferentes. El primer escenario representa una situación estática en la que un *UE* se coloca a 30 m del *eNB*. En el segundo caso de estudio, el *UE* se aleja del *eNB* a una velocidad constante, de 1,38 m/s (5 kph, velocidad promedio de un humano al caminar) sin cambio de dirección. Finalmente, el tercer escenario consiste en un *UE* que se mueve alrededor del *eNB* a una velocidad aleatoria en el intervalo [0, 5] m/s y con cambios de trayectoria aleatorios periódicos. El movimiento está limitado dentro de un cuadrado de 80m x 80m.

Como se mencionó anteriormente, se han introducido artificialmente y de manera controlada diferentes distorsiones de red para evaluar el rendimiento de las técnicas de *streaming* adaptativo para el servicio LTE sobre una red LTE emulada. Específicamente, se ha introducido un retardo, *Interpacket delay*, adicional de {0, 25, 50, 75 y 100} ms y una *Packet Loss Rate (PLR)* de {0; 0,05; 0,1; 0,2; y 0,3}%. La secuencia de video empleada para estos experimentos es "*Big Buck Bunny*" con una duración de 180 s. Para cada uno de los escenarios y condiciones de red estudiados, se realizan 10 repeticiones del experimento, para evitar singularidades. Por lo tanto, los resultados presentados consisten en el valor promedio y los intervalos de confianza para cada una de las métricas bajo consideración. Concretamente, se realiza la medición del número y la duración de los eventos de *stalling*, el tiempo de búfer inicial y la estimación de la QoE en términos de MOS.

A continuación, se presentan los resultados encontrados para discutir la relación entre los parámetros de QoS estudiados (*Interpacket delay* y *Packet Loss Rate - PLR*), los *KPI* identificados (eventos de *stalling* y el tiempo de búfer inicial) y, finalmente, la QoE obtenida en términos de MOS. Además, como se ha ajustado manualmente el nivel de *Interpacket delay* y *PLR* en cada escenario, también se presentan los valores evaluados de otras métricas de QoS, como son el *Jitter* y el *Throughput*. Como se explicó anteriormente, se ha empleado el modelo ITU-T P.1203 para la estimación de QoE. Finalmente, los resultados presentados corresponden al valor promedio extraído de las 10 pruebas realizadas para cada escenario; también se muestran los intervalos de confianza correspondientes ($\alpha = 0.05$).

De la Figura 5.6 a la Figura 5.9, se presentan la respuesta del sistema en el escenario 1, al introducir de manera controlada en la transmisión del video diferentes valores de *Interpacket delay*. La Figura 5.6 representa el comportamiento de los parámetros de QoS considerados (*Jitter*, *Throughput* y *Packet loss*) bajo estas condiciones. Se obtiene una respuesta esperada, evidenciada por la disminución del *Throughput* de todas las técnicas de *streaming* adaptativo monitoreadas cuando se incrementa el *delay*. Centrándose en el impacto de estas condiciones de transmisión degradadas, para las diferentes técnicas de *streaming* adaptativo, se observa que la técnica *DASH* es más robusta en términos de *jitter* y *packet loss* al usar la estrategia de reducir su rendimiento cuando las condiciones de la red son malas. Esta robustez se evidencia nuevamente en el número y duración de eventos de *stalling* presentados (ver Figura 5.7). Claramente, la técnica *DASH* es la que tiene la mejor respuesta teniendo en

cuenta estos KPI. Por otro lado, la técnica de *streaming* adaptativo HSS es el que presenta la degradación más notable. Se observa que el comportamiento general de todas las técnicas de *streaming*, en términos de eventos de *stalling*, está muy relacionadas con su rendimiento en términos de *jitter* y *packet loss* (ver Figura 5.6). Los buenos resultados de DASH pueden explicarse por el tiempo de búfer inicial que presenta antes de comenzar la reproducción del video (ver Figura 5.8). Claramente, es la técnica que emplea un período más largo para esta tarea.

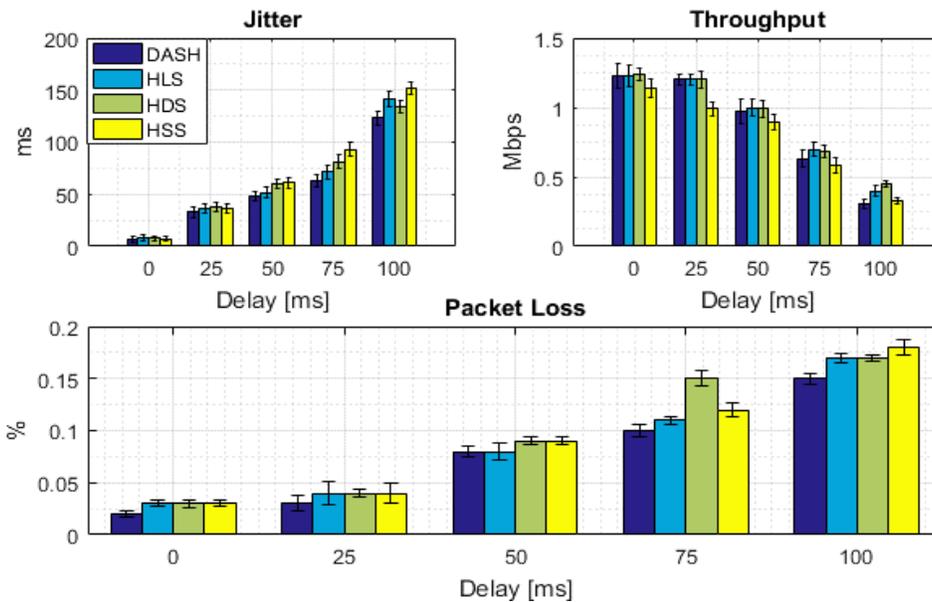


Figura 5.6. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de *delay*. Escenario 1

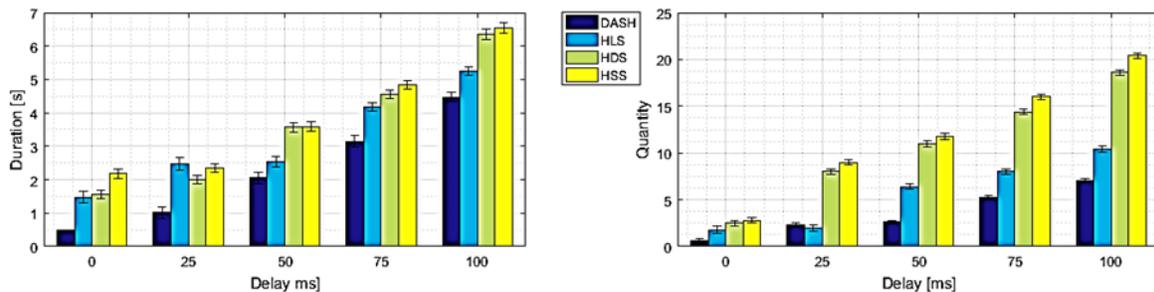


Figura 5.7. Eventos de *stalling* obtenidos con diferentes valores de *delay*. Escenario 1

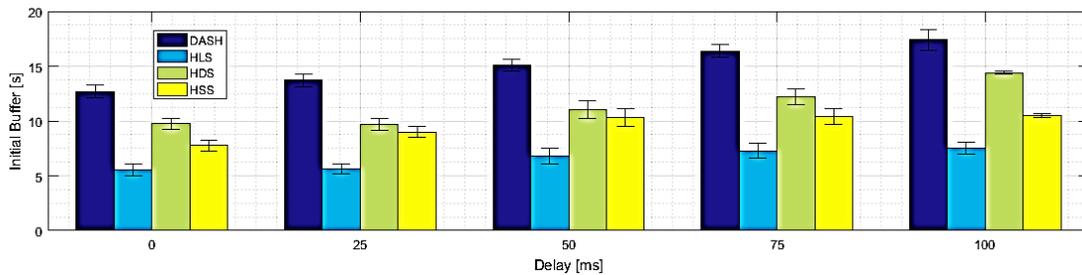


Figura 5.8. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de *delay*.
Escenario 1

Desde una perspectiva de QoE, la Figura 5.9 muestra que para un *delay* introducido inferior a 25 ms, se obtienen valores de MOS superiores a 4 (“bueno”) para todas las técnicas bajo evaluación. A partir de este *delay*, la MOS comienza a decaer en todos los casos, pero la técnica *DASH* siempre presenta una estimación de QoE más alta en comparación con los demás.

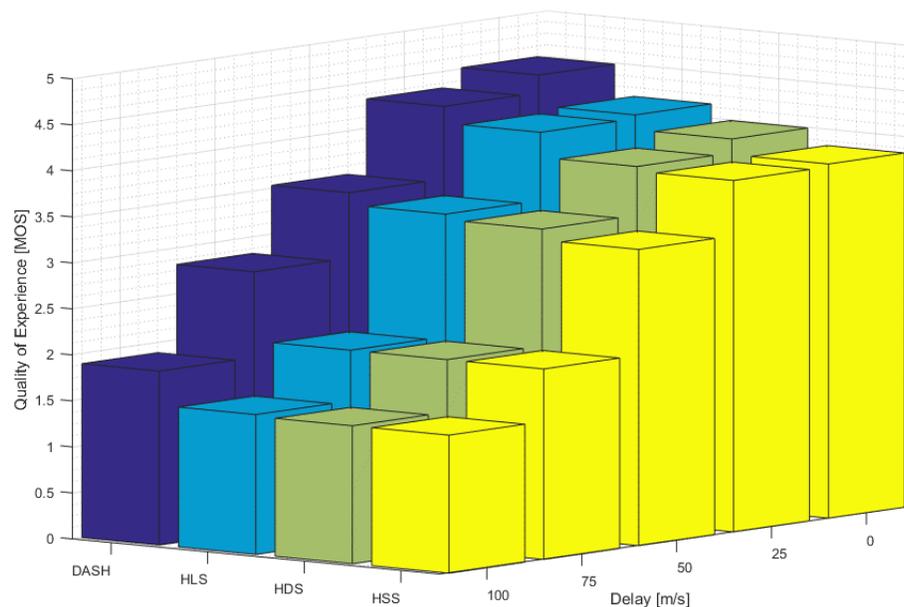


Figura 5.9. QoE y *Delays* para diferentes técnicas de *streaming* adaptativo en el escenario 1

Se ha realizado un análisis similar, pero en lugar de ajustar el parámetro *interpacket delay*, se han introducido artificialmente diferentes valores de *packet loss rate* (pérdida de paquetes), ver Figura 5.10 a Figura 5.13. En la Figura 5.10, se puede observar la degradación de los parámetros QoS causada por un *PLR* creciente. A diferencia del experimento anterior, en este caso el rendimiento superior de *DASH* no es tan notable,

pero se puede observar la estrategia de adaptar la velocidad de transmisión de datos de video (*Throughput*) cuando las condiciones de la red son más adversas. Sin embargo, en el caso de los *KPI* bajo consideración, un mayor número de eventos de *stalling* y de mayor duración, aparecen en el resto de las técnicas de *streaming* adaptativas en comparación con el rendimiento de *DASH* (ver Figura 5.11). Por lo tanto, se puede inferir que el rendimiento de la reproducción de video es mucho mejor en el caso de usar *DASH* a expensas de un tiempo de búfer inicial mucho más prolongado (Figura 5.12). Desde una perspectiva de QoE, esta estrategia parece funcionar bien como se demuestra en la Figura 5.13. El desempeño de la técnica de *streaming* adaptativo *DASH* es superior al desempeño obtenido con las otras técnicas de *streaming* para los diferentes experimentos realizados.

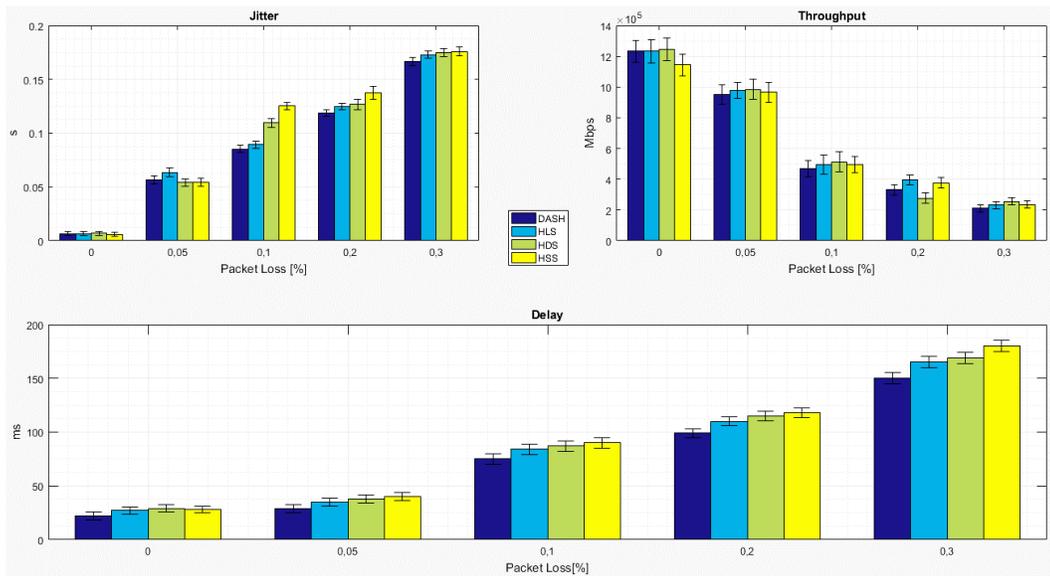


Figura 5.10. Evolución de los parámetros de QoS con diferentes valores de *packet loss*. Escenario 1

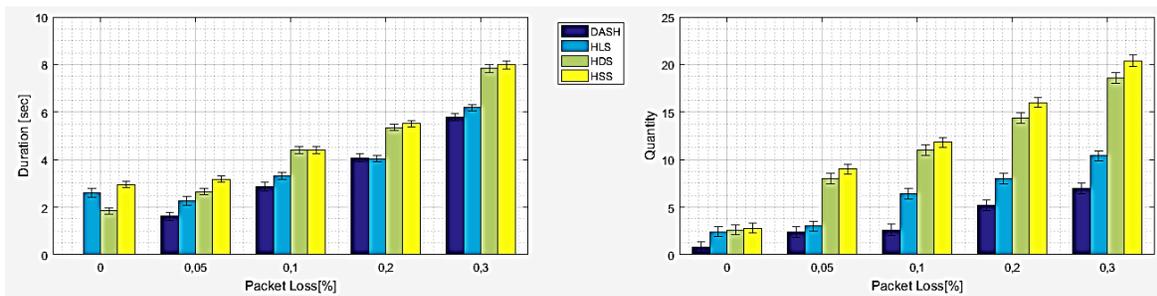


Figura 5.11. Eventos de *stalling* obtenidos con diferentes valores de *packet loss*. Escenario 1

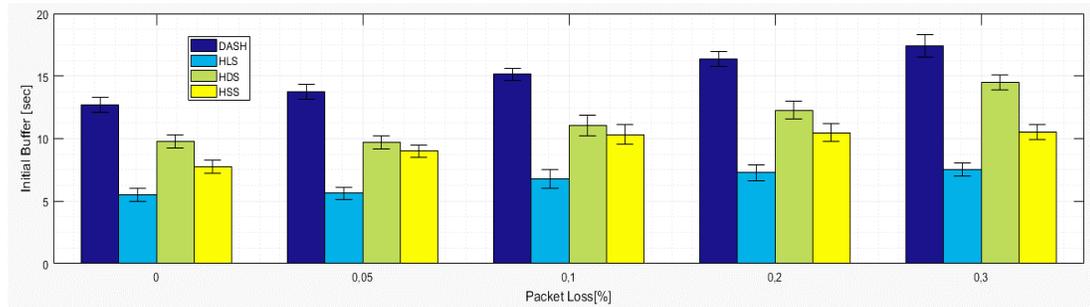


Figura 5.12. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de *packet loss*.
Escenario 1

Se observa la relación directa entre la *QoE* estimada (ver Figura 5.13) y el número de eventos de *stalling* (ver Figura 5.11), que están claramente determinados por el *jitter* y el *delay* causado por el *PLR* introducido (ver Figura 5.10). Por lo tanto, se podría inferir el impacto de los parámetros de *QoS* medibles en los *KPI* seleccionados y, finalmente, en la *QoE* estimada por el modelo ITU-T P.1203. Comparando el efecto del *delay* introducido artificialmente (ver Figura 5.9) y la *PLR* (ver Figura 5.13), este último tiene un mayor impacto en la *QoE*, evidenciado con una mayor disminución en los niveles del *MOS* alcanzado en todos los protocolos de *streaming* adaptativos bajo estudio.

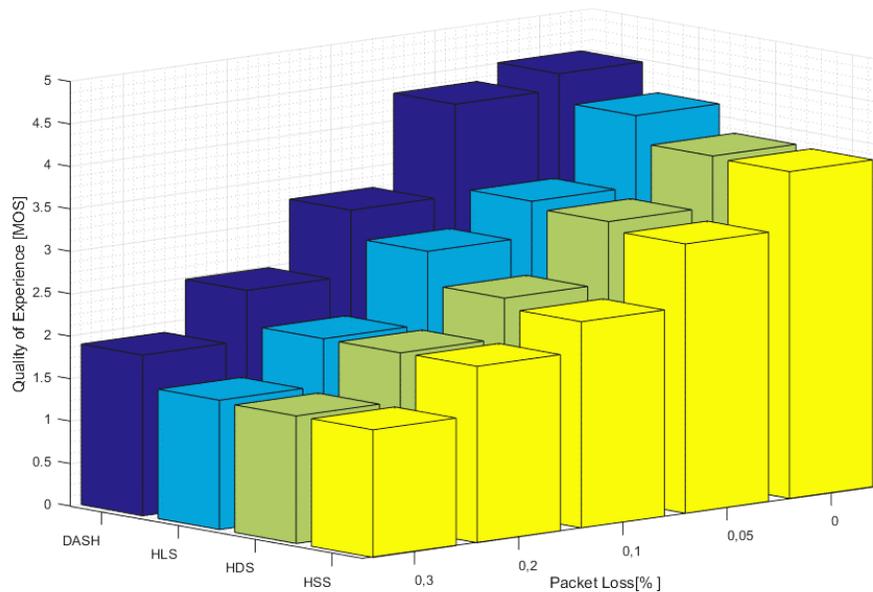


Figura 5.13. *QoE* y *PLR* para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 1

Hasta esta parte del documento, el estudio se ha enfocado a establecer la relación entre los diferentes parámetros bajo estudio en una situación estática (UE sin movimiento), la cual está definida por el escenario 1. A partir de este punto, se enfoca el estudio a estimar el impacto que ocasiona la movilidad del UE en las métricas de QoS consideradas y la estimación de la QoE. Para tal fin, en el escenario 2, el UE se aleja del *eNB* siguiendo una línea recta a una velocidad uniforme de 1,38 m/s.

Inicialmente, se considera el caso de variación del *delay*. Los parámetros de QoS, calculados y que se encuentran asociados a este tipo de variación son: *jitter*, *throughput* y *packet loss*. En la Figura 5.14, se observa un comportamiento muy similar al presentado en el escenario 1, en donde se observa una disminución del *throughput* de todas las tecnologías de *streaming* adaptativo monitoreadas cuando el valor de *delay* se incrementa. Al igual que el escenario estático, con una baja movilidad del UE, esto es, una velocidad de un usuario peatonal, la técnica de *streaming* adaptativo *DASH* es más robusta en términos de *jitter* y *packet loss*, lo cual es evidenciado por el número y duración de eventos de *stalling* presentados (ver Figura 5.15); claramente, la técnica *DASH* es el que tiene la mejor respuesta teniendo en cuenta estos *KPI*. Por otro lado, similar al escenario estático, la técnica que presenta mayor degradación de los parámetros de QoS es *HSS*. Se observa nuevamente, como el comportamiento general de todas las técnicas de *streaming*, en términos de eventos de *stalling*, está muy relacionadas con su rendimiento en términos de *jitter* y *packet loss* (ver Figura 5.15). Por otro lado, en la Figura 5.16 se observa que la técnica *DASH* es la que mayor tiempo de búfer inicial utiliza, lo cual puede explicar los buenos resultados obtenidos de esta técnica con respecto a los otros parámetros.

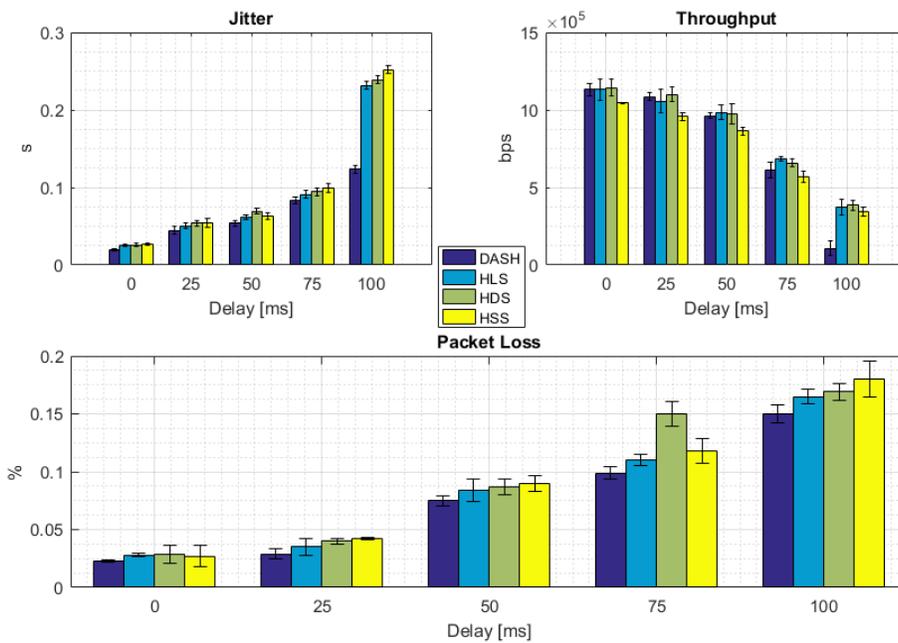


Figura 5.14. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de delay. Escenario 2

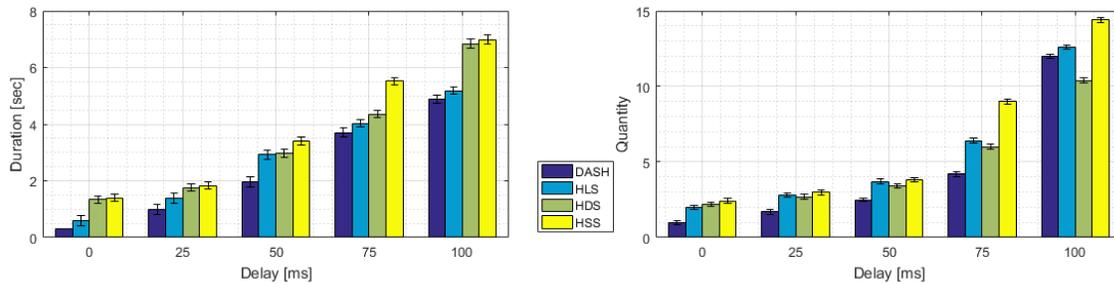


Figura 5.15. Eventos de *stalling* obtenidos con diferentes valores de *delay*. Escenario 2

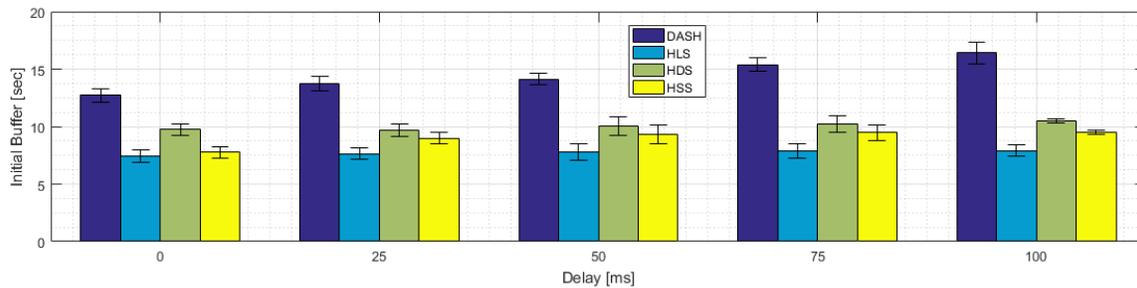


Figura 5.16. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de *delay*. Escenario 2

Desde una perspectiva de QoE, la Figura 5.17 muestra el efecto de la variación del *delay* en el sistema presentado, para las diferentes técnica de *streaming adaptativo*,

en donde se aprecia, para todas las técnicas estudiadas, que para valores menores a 50 ms, se obtiene una evaluación de “buena”; por el contrario, cuando el retardo es igual a 50 ms, sólo la técnica *DASH* presenta una estimación de la QoE de “buena”. Cuando el retardo es de 75ms, la estimación de la QoE es de “regular”. A partir de ese valor, la estimación de la QoE es “pobre” con tendencia a “mala”. Al observar los valores de QoE y los eventos de *stalling*, en el escenario 1 y 2, se puede apreciar que la cantidad de eventos de *stalling* y su duración, tienen un efecto determinante en el valor estimado de la QoE.

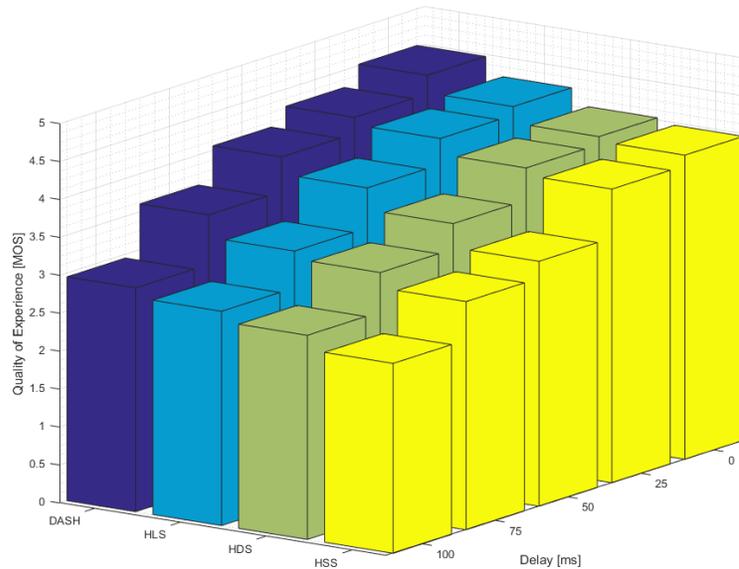


Figura 5.17. QoE y *Delays* para diferentes técnicas de *streaming* adaptativo en el escenario 2

De la Figura 5.18 a la Figura 5.21, se presentan la respuesta del sistema en el escenario 2, al introducir diferentes valores controlados de *packet loss* en la transmisión de video. La Figura 5.18 representa el comportamiento de los parámetros de QoS considerados (*Jitter*, *Throughput* y *Delay*) bajo estas condiciones. Se observa una disminución de todas las métricas de QoS estudiadas cuando se incrementa el valor del *packet loss*, lo cual es un comportamiento esperado. Se resalta dentro de la variación de los parámetros de QoS, como el valor del *Jitter* aumenta de una manera considerable cuando el valor de *packet loss* supera el 0.05% en todas las tecnologías de *streaming* adaptativo, se observa como una *PLR* mayor al 0,1% supera los 200ms de *Jitter*. La anterior situación, y como se evidencia en la QoE estimada es un mal escenario, en donde la prestación del servicio LVS es inviable.

Por otro lado, el valor del *delay* supera los 50 mseg cuando el valor de porcentaje de *packet loss* se encuentra por encima de 0.05%, lo cual pone en manifiesto la alta sensibilidad del sistema evaluado frente a la *PLR*. Se observa, al igual que el escenario 1, que la técnica *DASH* es la que presenta un mejor desempeño, con respecto a las métricas de QoS estudiadas.

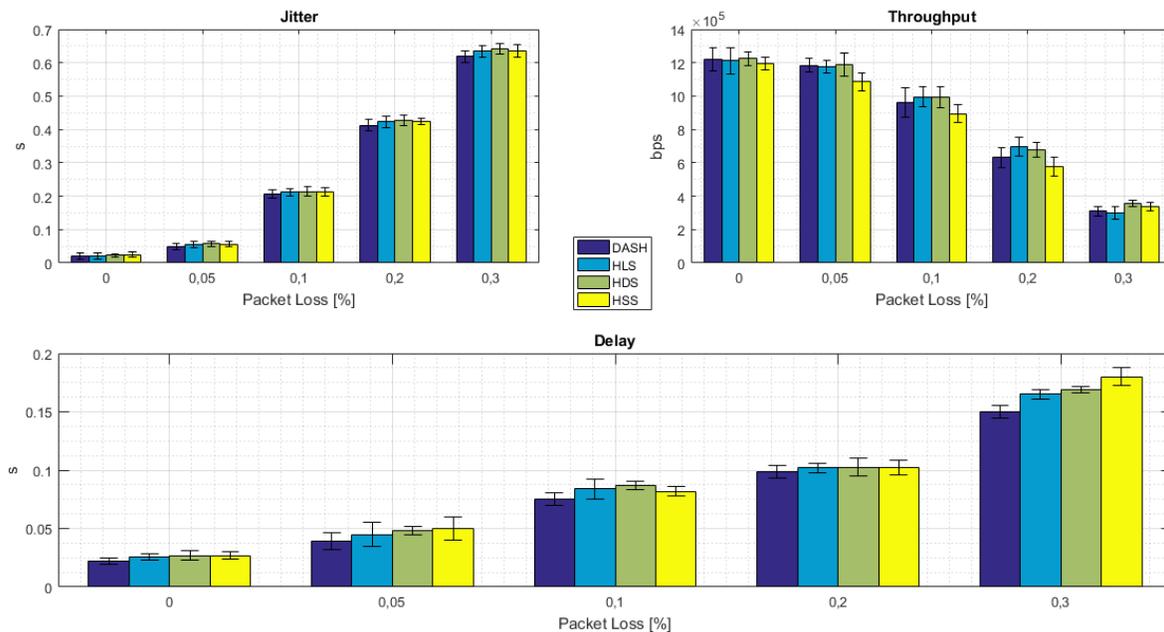


Figura 5.18. Evolución de parámetros de QoS con diferentes valores de *packet loss*. Escenario 2

Con respecto a los *KPIs* presentados en la Figura 5.19 y Figura 5.20; se observa que a partir del 0.1% de pérdida de paquetes, el número y duración de eventos de *stalling* (ver Figura 5.19) se incrementan considerablemente, lo cual trae como consecuencia una baja evaluación de la QoE (Ver Figura 5.21). Con respecto al *KPI* de búfer inicial, se muestra en la Figura 5.20 que, para los diferentes valores de *PLR*, la tecnología que utiliza mayor tiempo de búfer para este parámetro es *DASH*.

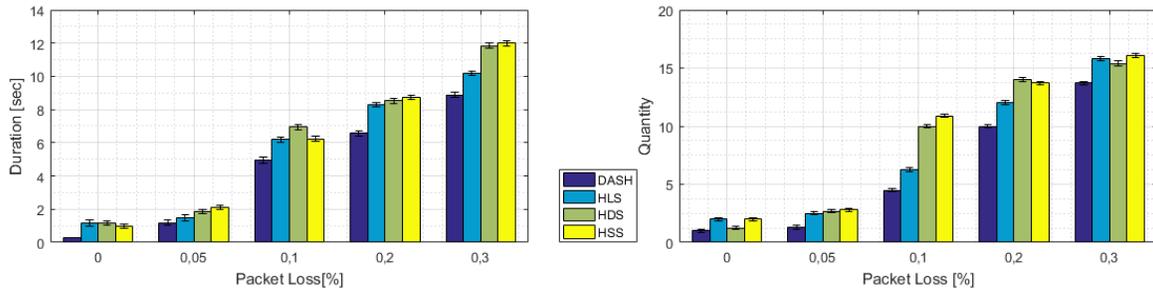


Figura 5.19. Eventos de *stalling* obtenidos con diferentes valores de *packet loss*. Escenario 2

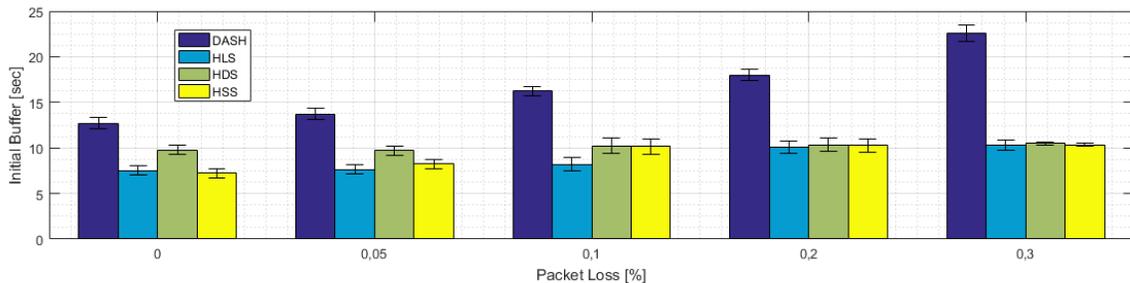


Figura 5.20. Tiempo de búfer inicial con diferentes niveles de *packet loss*. Escenario 2

La estimación de la QoE en el sistema bajo estudio, se observa en la Figura 5.21, que para un porcentaje de pérdida de paquetes de 0.05%, se obtiene un valor de “*regular*” en todas las técnicas de *streaming*, a excepción de *DASH* con el cual se obtiene un valor de “*bueno*” en la QoE. A partir del 0,1% de pérdida de paquetes, se observa para todas las técnicas de *streaming*, una fuerte degradación en la evaluación de la QoE. Nuevamente, al igual que el escenario 1, se observa una mejor evaluación de la QoE con la técnica *DASH*.

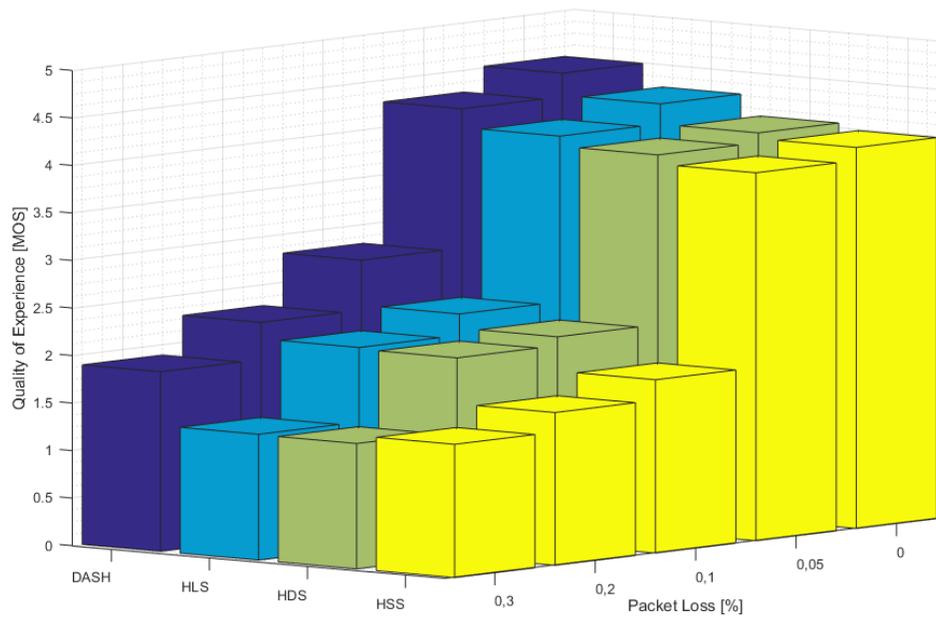


Figura 5.21. QoE vrs. *Packet loss* para diferentes técnicas de *streaming* adaptativo en el escenario 2

La Figura 5.22 muestra, durante un test de emulación, las diferentes ubicaciones que asume el *UE* respecto al *eNB* mientras utiliza el servicio de LVS bajo prueba.

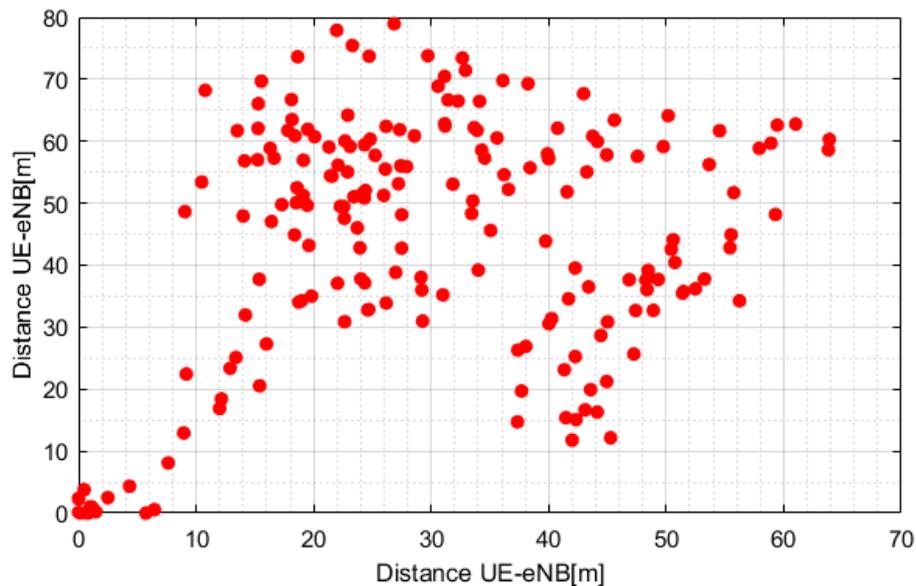


Figura 5.22. Ubicación del *UE* frente al *eNB*

Las Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25 muestran los resultados obtenidos para los parámetros de QoS, los *KPI* y la estimación de QoE para las diferentes técnicas

de *streaming* adaptativo estudiadas cuando un *UE* se mueve alrededor de la *eNB* con velocidad aleatoria en un intervalo [0, 5] m/s y con cambios de trayectoria aleatorios. El movimiento se limita al interior de un cuadrado de 80m x 80m con el *eNB* ubicado en el vértice inferior izquierdo del mismo (escenario 3). Para realizar el análisis de QoS y QoE en este escenario, no se introducen de forma controlada variaciones de *packet loss* ni de *delay*. Los valores medidos para los diferentes parámetros de QoS son la respuesta de éstos a las variaciones en velocidad y posición aleatoria que se generan dentro del ambiente de emulación.

Para los parámetros de QoS, ver Figura 5.23, se aprecia en este escenario de emulación, para todas las técnicas de *streaming*, que el valor del *Jitter* es inferior a 10 ms, el parámetro de *delay* es menor a 18 ms, el *Throughput* obtenido se encuentra alrededor de 1 Mbps y la pérdida de paquetes es del orden de 0.05%.

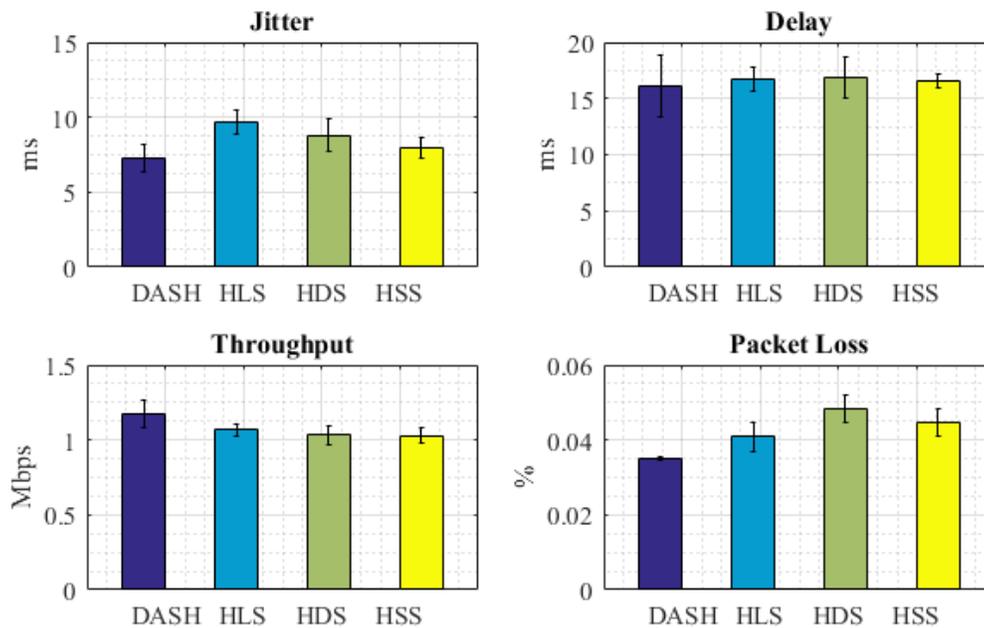


Figura 5.23. Parámetros de QoS para diferentes técnicas de *streaming* en el escenario 3

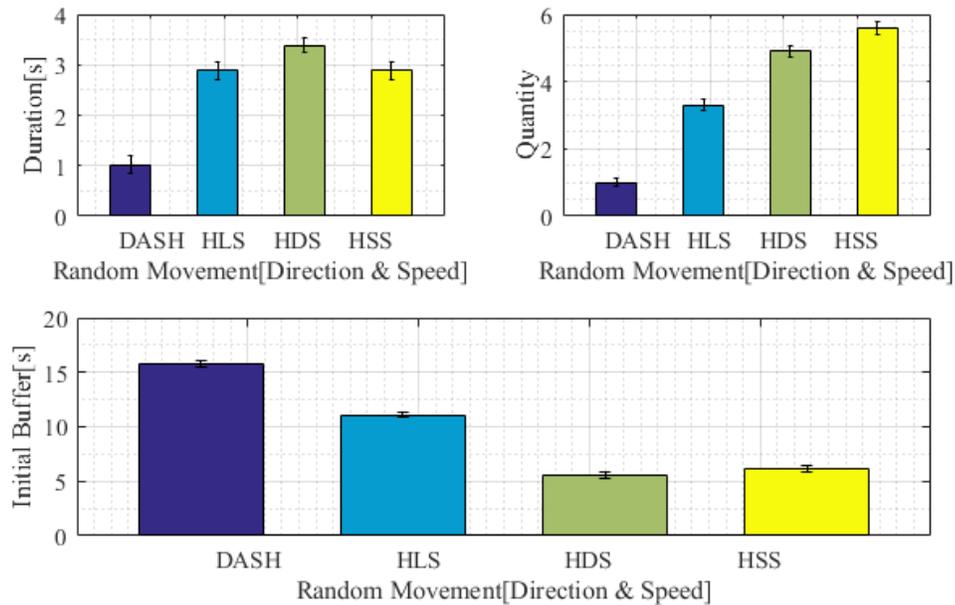


Figura 5.24. KPI's de QoE para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 3.

En la Figura 5.24 se aprecian los KPI de cantidad y duración de eventos de *stalling*, en donde para la técnica de *DASH* presenta los valores más bajos, este comportamiento, como se observó en los escenarios 1 y 2, es consecuencia del comportamiento de los parámetros de QoS. En la Figura 5.24, también se aprecia que la técnica *DASH* emplea mayor tiempo de búfer inicial que las otras técnicas. El valor de este parámetro, podría ser la consecuencia que *DASH* presente menos cantidad y duración de eventos de *stalling*, lo cual generará un efecto positivo notable en la estimación de la QoE.

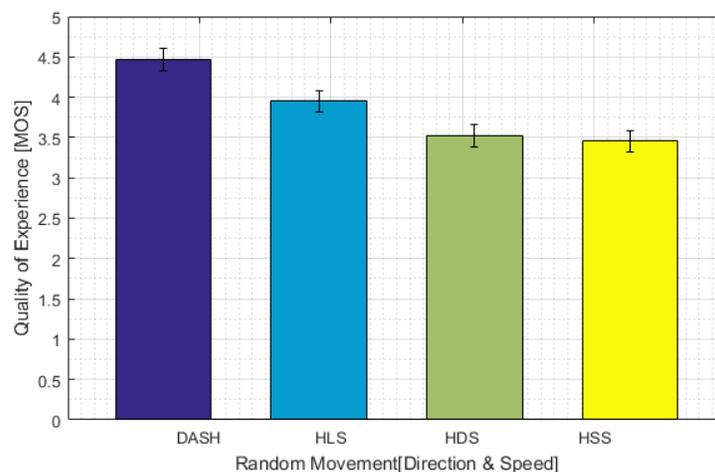


Figura 5.25. QoE para diferentes técnicas de streaming adaptativo en el escenario 3

En la Figura 5.25 se observa como la técnica de streaming adaptativo *DASH* presenta la mejor estimación de QoE (*buena*) para las condiciones de emulación del escenario 3. Nuevamente se observa que el valor estimado de QoE es menor para la técnica *HSS*.

5.3 Estimación de la 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 [57]. El inconveniente de este método es que este es demasiado largo, costoso y sobre todo que involucra directamente a los usuarios.

A continuación, se presenta un estudio subjetivo realizado en los laboratorios de telecomunicaciones de la Universidad del Quindío, de un caso de uso muy particular, mediante el cual se obtiene la QoE del servicio de LVS en una red LTE emulada.

Se utiliza para la realización del presente estudio las recomendaciones ITU-R BT.500-13 [122], ITU-T P.910 [39] y ITU-T P.913 [123], las cuales definen metodologías para el desarrollo de experimentos subjetivos. Estas recomendaciones se han utilizado con éxito durante muchos años para realizar evaluaciones subjetivas de calidad audiovisual y calidad de vídeo y fueron diseñadas inicialmente para entornos de servicios fijos de vídeo para televisión, para ambientes silenciosos y sin distracciones; pero en la actualidad, se han redefinido y ampliadas para incluir nuevos paradigmas de observación de vídeo, como el servicio de vídeo por internet y la calidad de distribución de televisión.

5.3.1 Experimento realizado en la Universidad del Quindío

De las metodologías disponibles en las recomendaciones para la evaluación subjetiva no interactiva de vídeo, se elige el método de Índice por Categorías Absolutas (*ACR*) presentado en [39]. En donde se define el rango de calificaciones, de este método, en una escala numérica de cinco valores: 1-1.9 = malo (*bad*), 2-2.9 = pobre (*poor*), 3-3.9 = regular (*fair*), 4-4.9 = bueno (*good*) y 5 = excelente (*excellent*). De acuerdo a la Figura

5.26, la presentación de las secuencias a los usuarios, se realiza una tras otra en la pantalla completa del terminal móvil o fijo, intercalando un periodo de 10 segundos para registrar la calificación de cada secuencia de vídeo.



Figura 5.26. Diagrama de presentación de secuencias ITU-T P.910

5.3.2 Descripción del escenario de obtención de vídeos

En la Figura 3.1 se muestra el escenario de experimentación, en donde se obtuvieron los vídeo. El mencionado escenario consta de un servidor de Live Video *streaming*, una herramienta de emulación LTE desarrollada mediante LENA de NS-3 y un cliente UE. A partir de la aplicación desarrollada en el cliente, que emula un usuario dentro de una red LTE, y que utiliza la técnica de streaming adaptativo *DASH*, se realiza la petición a un servidor de video *streaming* en vivo. En la red emulada *LTE* se evalúa una situación muy particular, en la cual se varían controladamente los tiempos de retardo de la red {0; 25; 50; 75 y 100} ms de un *UE* que se aleja del *eNB* con velocidad y dirección uniforme de 1,38 m/s. Este escenario de experimentación fue definido en la sección anterior como el escenario 2. Cada una de las secuencias generadas son grabadas y almacenadas en el cliente, las cuales serán posteriormente presentadas a los usuarios que realizarán la respectiva evaluación de QoE.

Para grabar las secuencias, se utiliza el software libre *open Broadcaster Software – OBS* [128], el cual graba el audio y vídeo con la misma resolución a la cual se reproduce.

5.3.3 Selección de secuencias

Para la prueba de estimación de QoE, se seleccionan 4 categorías de vídeos para su transmisión, los cuales se ajustan a las características espacio-temporales definidas en el Anexo I, cuadro A.1 de la recomendación ITU-T 910 [39], estas son: entrevista (categoría A), dibujos animados (categoría B y D), partido de fútbol (categoría C) y película (Categoría E). Esta categorización fue utilizada en la Sección 4.2 en la actividad de modelado de tráfico. Para cada categoría de vídeo, se varía de forma controlada los 5 valores de retardos de la red propuestos. De lo anterior, se obtienen 20 secuencias de vídeo para el experimento; cada secuencia descargada tiene una duración de alrededor 20 segundos.

Para cada una de las condiciones de evaluación, se varía el contenido de vídeo (entre las 4 categorías) para evitar dos efectos secundarios asociados a la presentación de secuencias [129]:

- Efecto de aprendizaje; los observadores pueden reconocer objetos de una secuencia de baja calidad si los han visto anteriormente en una mejor calidad; lo cual genera una opinión parcial.
- Efecto de aburrimiento; los usuarios se aburren si los mismos contenidos se muestran repetidamente, inclusive en sesiones cortas, menores de 15 minutos.

Se realiza la prueba de *Snellen* e *Ishihara* (definida en [123]) a todos los evaluados, antes de iniciar la sesión, para determinar su agudeza visual y normal visión de colores. Con respecto a la agudeza, no deben de haber, entre los usuarios, errores en la línea 20/30 de un diagrama de ojo normalizado de b-Snellen. El diagrama es graduado a una distancia de observación de la prueba (2.8 m) y la prueba se realiza en el mismo sitio en que se observarán las imágenes de vídeo. En cuanto al color, de los usuarios encuestados, se utilizan 4 imágenes de prueba de *Ishihara*. En el anexo D se presentan los test utilizados para mediar la agudeza visual y normal visión de colores.

5.3.4 Diseño del experimento

En el diseño del experimento, se incluyen dos reiteraciones (es decir, repeticiones de condiciones idénticas) en el experimento. Lo anterior permite medir la "variación en el mismo sujeto" empleando datos repetidos. Para comprobar la fiabilidad de un sujeto se utiliza el mismo orden de presentación en condiciones idénticas.

Las reiteraciones facilitan el cálculo de la fiabilidad individual de cada sujeto y, si fuera necesario, descartar resultados no fiables de algunos sujetos. Una estimación de la desviación típica en el mismo sujeto y entre sujetos es además un requisito previo para efectuar un análisis correcto de la varianza y para generalizar resultados a una población más amplia. Además, los efectos del aprendizaje en una prueba quedan compensados en cierta medida.

Por otro lado, para obtener una mejora adicional en el tratamiento de los efectos del aprendizaje, se utiliza una sesión de instrucción. Estas condiciones se eligen de modo que sean representativas de las presentaciones que se van a mostrar más adelante durante la sesión. Las presentaciones preliminares no se tienen en cuenta en el análisis estadístico de los resultados de la prueba.

5.3.5 Observadores

De acuerdo a [39], El número posible de sujetos en una prueba de observación (así como en pruebas de utilidad en terminales o servicios) varía de 4 a 40. Cuatro es el mínimo absoluto por razones estadísticas, mientras que difícilmente se obtengan mayores ventajas con más de 40 sujetos. Por otro lado, en [123] se define que se deben usar al menos 24 sujetos para experimentos realizados en un ambiente controlado y utilizar al menos 35 sujetos para experimentos realizados en un entorno público. El número real para una determinada prueba debe establecerse, en la práctica, en función de la validez requerida y de la necesidad de efectuar una generalización de una muestra a una población mayor. Por lo general en el experimento deben participar 15 observadores como mínimo. Estas personas no deben tener como trabajo habitual evaluar la calidad de imagen ni mucho menos ser evaluadores experimentados. Para la prueba realizada, se emplean un total de 45 usuarios, de los cuales 4 no pasaron las pruebas *Snellen* e *Ishihara*, entre los 41 sujetos restantes, y de acuerdo a la fiabilidad individual de cada sujeto se determinarán la cantidad a descartar.

5.3.6 Condiciones de Evaluación

La prueba consiste de 24 secuencias de evaluación organizadas en 3 bloques:

- Bloque 1: Entrenamiento y familiarización (4 secuencias)
- Bloque2: Condiciones para evaluar el impacto del retardo en la red LTE de las diferentes categorías de video (Clase A, B, C, D y E). 16 secuencias.

- Bloque 3: Condiciones para medir la fiabilidad del sujeto. Se repiten 4 secuencias del bloque 2.

En la Tabla 5.5 se muestran las 24 secuencias utilizadas con los respectivos tiempos de retardo de la red introducido de forma controlada.

Bloque	Identificador	Retardo (mseg)	Tipo imagen
1	E1	0	Entrevista: A
	E2	25	Dib. Animados: B
	E3	50	Deportes: C
	E4	25	Película: E
2	1	0	B
	2	25	A
	3	75	E
	4	100	C
	5	50	B
	6	100	A
	7	75	B
	8	0	C
	9	100	B
	10	50	A
	11	0	E
	12	25	C
	13	100	E
	14	75	C
	15	50	E
	16	75	A
3	1	0	B
	2	25	A
	3	75	E
	4	100	C

Tabla 5.5. Clasificación de las condiciones de evaluación utilizadas en la QoE subjetiva

La distribución de tiempos de la prueba se realiza de la siguiente manera:

- 4 Secuencias (50 segundos cada uno) de entrenamiento
- 16 secuencias (50 segundos cada uno) Bloque1
- 4 secuencias (50 segundos cada uno) Bloque 2
- Tiempo de votación de secuencia: 10 segundos cada uno.

Tiempo total por observador: 1440 segundos. 24 min

Para el desarrollo de la prueba, se realizan lee y explica a los asistentes la carta de instrucciones, la cual contiene los siguientes aspectos:

- Saludo y agradecimiento.

- Objetivo de la prueba.
- Aparición de secuencias de análisis y duración de las mismas.
- Tiempo de evaluación: Escala de evaluación.
- Se explica el concepto de criterio de calidad del video y que factores lo componen.
- Firma del Formulario de consentimiento.
- Cuestionario de evaluación.

Los modelos de carta de instrucciones, formularios de consentimiento y cuestionarios de evaluación se presentan en el anexo D.

5.3.7 Análisis Estadístico y notificación de resultados

A continuación, en la Tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos de las evaluaciones de QoE realizadas por los usuarios para cada una de las secuencias presentadas. Adicionalmente, se presenta el valor medio y la desviación estándar para cada grupo de secuencias. Por otro lado, en [123] se establece el criterio de rechazo de sujetos; en donde se utiliza el coeficiente de correlación lineal de *Pearson* (*linear Pearson correlation coefficient- LPCC*) como indicador para la toma de decisiones. El *LPCC* para un sujeto con respecto a todos los demás sujetos se calcula de acuerdo a (5.1):

$$LPCC(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}\right)}} \quad (5.1)$$

Donde x , y y n son arreglos de los datos y n el número de datos.

Para calcular *LPCC* sobre el estímulo individual, se calcula:

$$r_1(x, y) = LPCC(X, Y) \quad (5.2)$$

Donde en (5.1):

x_i : La QoE de todos los sujetos por secuencia de vídeo evaluada – SVE.

y_i : Puntaje individual de un sujeto para la SVE.

n : Número total de SVEs.

Se recomienda el umbral de descarte de $r_1 < 0.75$ para pruebas *ACR* de video. Por lo anterior, dos usuarios (25 y 36) son descartados de la prueba.

Secuencia de video Evaluada - SVE

Individuo	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	r1
Individuo 1	3	3	1	1	3	1	1	4	1	4	4	4	1	1	3	4	0.8959
Individuo 2	4	3	2	1	4	1	2	5	1	4	3	5	1	2	3	5	0.9205
Individuo 3	5	3	1	1	4	1	2	3	1	3	2	3	1	2	3	4	0.8519
Individuo 4	5	5	1	1	4	1	1	4	1	4	4	4	1	1	3	4	0.9396
Individuo 5	5	4	1	1	5	1	1	4	1	4	3	4	1	1	2	4	0.8882
Individuo 6	4	4	1	1	3	1	1	4	1	3	5	4	1	1	3	3	0.9583
Individuo 7	4	3	1	1	3	1	1	4	1	4	4	4	1	2	3	3	0.9604
Individuo 8	4	3	1	1	4	1	1	5	1	3	4	5	1	1	2	2	0.8899
Individuo 9	4	2	1	1	4	1	1	4	1	4	4	4	1	2	3	4	0.9133
Individuo 10	3	3	1	1	3	1	1	2	1	3	3	3	1	1	2	3	0.8831
Individuo 11	4	2	1	1	5	1	1	3	1	4	5	4	1	2	2	3	0.8674
Individuo 12	4	4	1	1	3	1	1	4	1	4	4	4	1	1	2	4	0.9388
Individuo 13	3	3	1	2	3	1	2	4	2	2	4	4	1	2	2	3	0.8785
Individuo 14	4	4	1	1	4	1	2	4	1	3	4	4	1	2	3	4	0.9632
Individuo 15	4	3	1	1	3	1	2	4	1	4	5	4	1	2	2	4	0.9310
Individuo 16	4	3	2	1	3	2	2	4	2	4	5	5	2	2	3	3	0.8837
Individuo 17	4	3	1	1	3	1	2	4	2	4	5	5	2	2	3	4	0.8568
Individuo 18	4	4	1	1	3	1	1	3	1	4	4	4	1	1	3	5	0.9026
Individuo 19	4	3	1	1	3	1	1	3	1	4	5	4	1	2	3	4	0.9372
Individuo 20	5	5	1	1	4	1	1	5	1	5	4	5	1	2	2	4	0.9267
Individuo 21	3	4	1	1	4	2	2	3	1	4	4	3	1	3	3	3	0.8399
Individuo 22	4	3	2	2	3	2	1	4	2	1	3	4	2	1	2	3	0.7594
Individuo 23	4	2	1	1	2	1	1	4	1	1	3	3	1	1	3	4	0.8716
Individuo 24	3	2	1	1	2	1	1	3	1	1	2	2	1	2	3	3	0.7528
Individuo 25	5	4	1	1	5	2	1	5	1	3	4	1	1	3	3	3	0.7169
Individuo 26	2	3	1	1	3	1	1	4	1	1	3	5	1	3	4	4	0.8070
Individuo 27	3	3	1	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1	1	2	3	0.8533
Individuo 28	4	3	1	1	3	2	2	4	1	1	4	4	1	1	3	5	0.8681
Individuo 29	5	3	1	1	2	1	1	3	1	1	3	4	1	1	2	4	0.8838
Individuo 30	4	3	1	1	3	1	1	3	1	2	5	4	1	2	4	4	0.8901
Individuo 31	4	4	1	1	2	1	1	3	1	2	3	4	1	2	2	4	0.8324
Individuo 32	4	4	1	1	4	1	2	5	1	4	5	5	1	2	3	3	0.8608
Individuo 33	4	3	1	1	2	1	1	4	1	1	3	4	1	2	3	4	0.8387
Individuo 34	3	3	1	1	2	1	2	3	2	3	3	3	1	2	3	3	0.8500
Individuo 35	4	1	1	1	3	1	2	4	1	2	5	4	2	3	3	4	0.8428
Individuo 36	2	2	1	1	1	1	1	4	2	3	2	4	1	2	2	4	0.6829
Individuo 37	3	2	1	1	3	1	1	3	1	2	3	3	1	1	1	3	0.9149
Individuo 38	4	3	1	1	2	1	1	4	1	3	4	4	1	2	3	4	0.9553
Individuo 39	4	4	1	2	3	1	2	5	2	3	4	4	1	2	3	4	0.8550
Individuo 40	5	4	2	1	5	1	2	3	2	3	4	4	1	2	3	4	0.8967
Individuo 41	2	3	1	1	2	1	1	5	1	1	3	3	1	2	2	4	0.8096
Promedio	3.829	3.171	1.098	1.073	3.146	1.122	1.341	3.780	1.195	2.878	3.732	3.829	1.098	1.756	2.659	3.683	
Desviación	0.803	0.834	0.300	0.264	0.963	0.331	0.480	0.791	0.401	1.187	0.923	0.863	0.300	0.624	0.617	0.650	

Tabla 5.6. Valores de QoE para las diferentes SVE

En la Figura 5.27 se presenta de forma gráfica los valores obtenidos en la prueba subjetiva para cada tipo de secuencia de acuerdo al retardo introducido. Se muestran los valores promedio de QoE y las barras de error representan el intervalo de confianza del 95%.

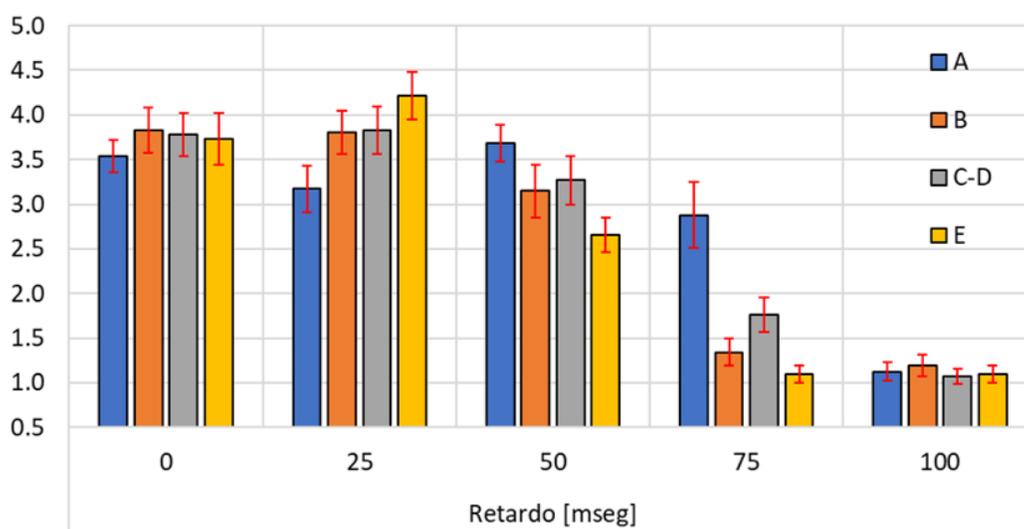


Figura 5.27. Evaluación de QoE para diferentes categorías de video y valores de retardo

De acuerdo a las categorías de imágenes, se puede apreciar como la categoría A, la cual corresponde a un video de una entrevista, presenta un mejor desempeño frente al aumento de valores de retardo en la red, la razón de este comportamiento se debe al bajo valor del índice de espacio/temporal de las imágenes que conforman el video. Por otro lado, el vídeo de categoría E (película), presenta el peor desempeño frente al aumento del retardo de la red lo cual seguramente es producido por al alto valor del índice espacio/temporal del video. Referente al índice *ACR*, se puede apreciar que la evaluación subjetiva para todas las categorías de videos y con un retardo inferior a 50 mseg, es de “regular”, a excepción de la categoría de película que es de “pobre” para 50 mseg. A partir de 75 mseg de retardo, los usuarios evaluados consideraron la QoE como “mala”, a excepción de la categoría de imagen A, que es evaluada como “pobre”. Para un retardo de 100 mseg, la evaluación de QoE es “mala” para todas las categorías de video.

5.4 Validación de la herramienta propuesta para la estimación de QoE objetiva

En esta sección, se valida la herramienta de estimación de QoE objetiva propuesta, y la cual se basa en la Recomendación ITU-T P.1203. Para esta actividad, se presentan los resultados mostrados en la Figura 5.28, en donde se comparan, para unas condiciones particulares, los valores estimados de la QoE (en términos de la MOS) obtenidos con: (i) la prueba subjetiva realizada en la sección 5.3, (ii) la herramienta de estimación de QoE objetiva propuesta y presentada en la sección 5.2 y (iii) la herramienta, para la estimación de QoE objetiva propuesta por Robitza *et al* en [60]; cuando se introducen de forma controlada retardos (*delay*) en la red.

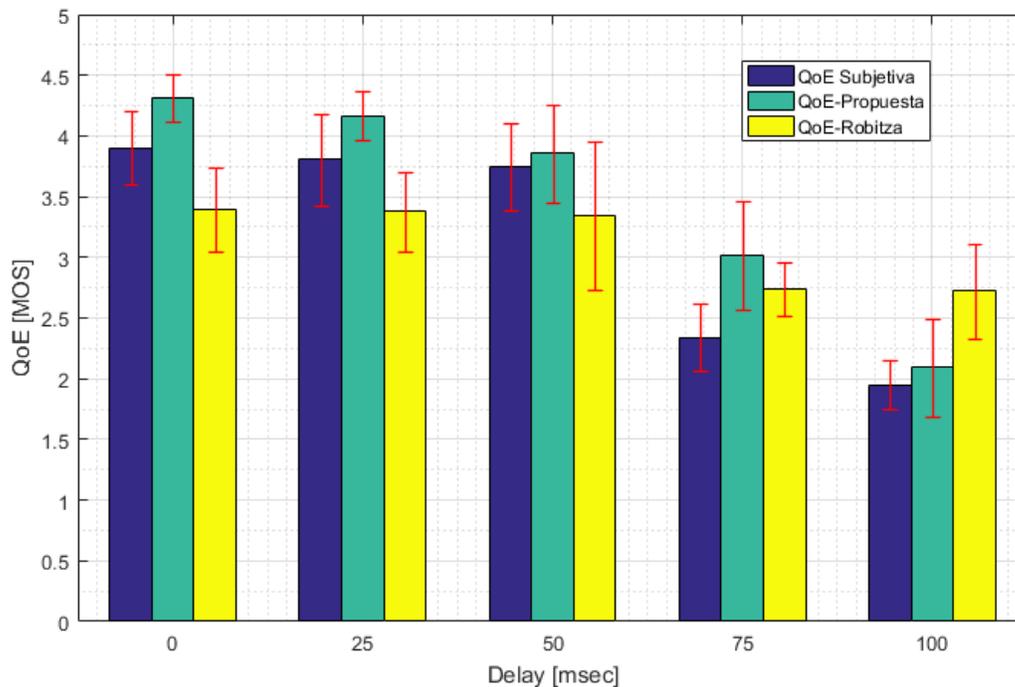


Figura 5.28. Estimación de QoE mediante diferentes métodos

Se puede observar, como los resultados de la QoE obtenidos con la herramienta propuesta en esta investigación, presentan un mayor grado de correlación con los resultados obtenidos con la prueba subjetiva. Además, se evidencia que la implementación propuesta es más reactiva al efecto de las variaciones de latencia

en la red. Los resultados de la propuesta de Robitza frente a las variaciones del retardo en la red, presenta dos resultados bien distinguidos: de 0 mseg a 50 mseg: “regular”, y de 75 mseg a 100 mseg: “pobre”. En este mismo contexto, la solución propuesta muestra una gradual de la MOS cuando aumenta el *delay*. Además, se observa que, en la mayoría de los casos, los intervalos de confianza también son más cortos en los resultados obtenidos con la implementación propuesta. En general, se puede ver que la herramienta para estimar la QoE objetiva propuesta en esta investigación, es más precisa en relación con la prueba subjetiva que la propuesta por Robitza en [60].

Para confirmar los anteriores resultados desde una perspectiva estadística, se realiza una prueba de ANOVA con la siguiente hipótesis nula: “No existen diferencia estadísticamente significativa entre las estimaciones de QoE obtenidas en la prueba subjetiva y las obtenidas por las diferentes implementaciones de la Recomendación ITU-T P.1203 ”. La Tabla 5.7 muestra el promedio de los cuadrados $\overline{x^2y^2}$; el factor F , la probabilidad P , el factor crítico de F : F_c y el coeficiente de *Pearson* r_1 . Debido a que en ambos métodos objetivos $F \leq F_c$, se puede confirmar que la hipótesis nula es verdadera, es decir, ambas soluciones se correlacionan bien con la prueba subjetiva. Centrándose en P , se puede concluir que la implementación que proporciona resultados más cercanos a los de la prueba subjetiva es el método propuesto, ya que la P alcanzada es mayor que la obtenida por el modelo de Robitza. Además, al analizar r_1 , se observa que el método propuesto tiene una mayor correlación lineal positiva con la metodología subjetiva. A la luz de estos resultados, se puede concluir que la herramienta presentada en este trabajo proporciona estimaciones de QoE más correlacionadas con pruebas subjetivas que la otra implementación presentada en [60], aunque esta última también proporciona resultados precisos.

Método		$\overline{x^2y^2}$	F	P	F_c	r_1
Propuesto	y	0.03396	0.05936	0.81363	5.31765	0.9912
Subjetivo						
Robitza	y	0.09581	0.10017	0.759726	5.3176550	0.9866
Subjetivo						

Tabla 5.7. ANOVA y coeficiente de *Person* obtenidos en la validación

5.5 Conclusiones preliminares

De acuerdo a los resultados obtenidos, y a las condiciones preestablecidas en los diferentes escenarios de experimentación estudiados, para la implementación del servicio de LVS en una red LTE, se pueden hacer las siguientes apreciaciones:

- Se ha presentado una implementación funcional del modelo ITU-T P.1203. De acuerdo a los resultados de validación de la herramienta propuesta para la estimación de la QoE y al ser comparada con una prueba subjetiva, se obtiene un coeficiente de *Pearson* similar al obtenido con la metodología presentada por *Robitza et al.* Lo anterior, valida el uso de la herramienta presentada para la estimación objetiva de QoE para servicios multimedia que utilicen un protocolo de transporte fiable (TCP), y que utilicen técnicas de transmisión progresiva y adaptativa.
- De acuerdo a los valores estimados de QoE para el sistema de emulación presentado, el modelo de propagación en exteriores mediante el cual se obtiene un grado de precisión mayor con respecto a estimaciones objetivas de QoE en entornos reales, es el modelo de propagación de *Nakagami-m* caracterizado con $m = 5$. Lo anterior ratifica los resultados obtenidos en la sección 3.2.2, donde se valida el mismo modelo de propagación a partir de parámetros de QoS.
- De la estimación de la QoE objetiva, utilizando la herramienta propuesta en este trabajo doctoral, para los protocolos RTMP y DASH se puede hacer la siguiente apreciación: El protocolo DASH presentó un mejor desempeño, en función de la QoE (MOS) respecto al protocolo RTMP, para el escenario real y para todos los escenarios emulados con diferentes modelos de propagación. Para el caso particular de reproducción de video con resoluciones de 480p y 720p y modelo de propagación *Nakagami-m* con $m=5$, la MOS obtenida para DASH es 4,5 y 4,3 (buena) respectivamente y para RTMP es 4,0 (buena) y 3,8 (regular) (ver Figuras Figura 5.3 y Figura 5.4). Se observa una estimación de la MOS mayor para la resolución de 480p en comparación con la obtenida para 720p. Se asume que este comportamiento es causado por la mayor cantidad de eventos de *stalling* ocurridos al usar una resolución más alta debido al mayor volumen de datos transmitidos.

- Frente a las variaciones controladas del parámetro de QoS: retardos (*Interpacket delay*), para el estudio de rendimiento de las diferentes técnicas de *streaming* adaptativas de video a partir de parámetros de QoE para los escenarios (estático y dinámico) de experimentación definidos en este trabajo doctoral, se pueden hacer las siguientes apreciaciones:
 - i) Para el escenario 1, el cual se considera como un escenario estático, se evidencia para las métricas de QoS, un aumento de *Jitter*, disminución del *Throughput* y aumento de *Packet loss*. A partir de los 50 ms de *delay* el *Jitter* supera los 50 ms, el cual se sale de los rangos de referencia (0 -50 ms) dado en [130] y el PLR alcanza 0,1% el cual es el máximo valor dentro de los rangos de referencia (0- 0.1%), ver Figura 5.6. Con respecto a la estimación de la QoE (ver Figura 5.9), para valores iguales o inferiores a 50 ms, para todas las tecnologías de *streaming* adaptativo estudiadas, el valor de la QoE es igual o superior a “regular” (3 – 3,9). Como se aprecia para las métricas de QoS y QoE, el valor de *delay* de 50 ms se considera como una cota máxima para garantizar la calidad del servicio de LVS en redes LTE. Adicionalmente, el valor de 50 ms se considera como un valor exigente, ya que los valores de referencia dados en [130] para este parámetros se encuentran en un rango de 0 - 400 ms.
 - ii) Para el escenario 2, escenario dinámico, se observa que las métricas de QoS, *Jitter* y *PLR*, también alcanzan los valores máximos de sus respectivos rangos cuando se superan los 50 ms de *delay*. Igual situación sucede con el *Throughput*, ya que al sobrepasar los 50 ms de *delay* esta métrica experimenta una degradación aproximada del 50%. Con respecto a la QoE, se observa que para valores de *delay* menores a 50 ms, se obtiene una evaluación igual o superior a “buena” (4 – 4,9); por el contrario, cuando el retardo es igual a 50 ms, sólo la técnica DASH presenta una estimación de la QoE de “buena”. Cuando el retardo es de 75ms, la estimación de la QoE es de “regular”. A partir de ese valor, la estimación de la QoE es “pobre” (2 – 2.9) con tendencia a “mala”. Nuevamente, el valor de 50 ms de *delay* se considera como un valor exigente.
 - iii) Con respecto a los KPI de QoE (eventos de *stalling* y búfer) para los escenarios 1 y 2, se evidencia que a medida que aumenta el *delay* la duración y cantidad de eventos de *stalling* se incrementan para todas las técnicas de *streaming* adaptativo estudiadas, ver Figura 5.7 y 5.14. Se observa un mejor

desempeño de estos indicadores de KPI para la técnica DASH, ya que presenta menor cantidad y duración de eventos de *stalling* que las otras, para cada uno de los valores de *delay* analizados. Con respecto al búfer inicial en los escenarios 1 y 2, ver Figura 5.8 y 5.16, el comportamiento es muy diferente, se observa que este KPI tiende a conservar su valor a medida que aumenta el *delay*; se evidencia que para la técnica DASH, el búfer inicial presenta una leve variación de 3 s, pasando de 13 s para 0 ms de *delay* a 16 s para 100 ms de *delay*, para el caso de las otras técnicas de *streaming*, este valor se conserva con el incremento del *delay* en 7 s para HLS, 10 s para HDS y 8 s para HSS.

- Frente a las variaciones controladas del parámetro de QoS: pérdida de paquetes (*PLR*), para los escenarios (estático y dinámico) de experimentación definidos, se pueden hacer las siguientes apreciaciones:
 - i) Para el escenario 1, ver Figura 5.10, se observa que a partir de 0.05% en la *PLR* un cambio abrupto de las otras métricas asociadas de QoS. Para este valor de *PLR* el *Jitter* aumenta aproximadamente de 8 ms a 50 ms para todas las tecnologías de *Streaming* estudiadas, los cuales se mantienen dentro de los parámetros de referencia de 0 – 50 ms dado por [130]. Igual situación sucede con el *Throughput*, que para valores mayores a 0.05% de *PLR*, decae en un 50%, pasando de 1 Mbps a 0.5 Mbps. Para la métrica de *PLR*, la evaluación de la QoE mediante la MOS es igual o superior a “regular” para valores iguales o inferiores a 0.05% para todas las tecnologías de *streaming* adaptativo estudiadas. Ver Figura 5.13. A partir de ese valor de *PLR*, ya la QoE alcanza una evaluación de “pobre” (2 – 2,9) o menor.
 - ii) Para el escenario 2, ver Figura 5.18, se evidencia que para un valor de 0.05% de *PLR* el valor del *Jitter* alcanza 50 ms y el *delay* 50 ms, encontrándose el *Jitter* en el valor máximo del rango de referencia. Para la estimación de la QoE, Ver Figura 5.21, se observa que al superar los 0.5% de *PLR*, el servicio de LVS es inviable, desde el punto de vista del usuario.
- Para todos los escenarios de prueba estudiados, para un UE fijo y con movilidad (uniforme y aleatoria), se observa que el mayor grado de satisfacción de usuario se obtiene empleando, la tecnología de *streaming* adaptativo DASH.

Capítulo sexto

6. Validación a partir de la capa física LTE y parámetros de QoE

El objetivo de esta sección es validar las prestaciones de un servicio de LVS para una red LTE emulada mediante parámetros de QoE. Para este estudio, se utiliza el escenario de experimentación y la herramienta para estimar la QoE desarrollada y presentada en este trabajo doctoral. El parámetro de la capa física que será objeto de comparación es *PRB* (*Physical Resource Block*), definidos por la norma 3GPP. La comparación será realizada a partir de los diferentes valores estimados de la QoE cuando se varía de forma controlada la cantidad de *PRB* que se asignan a una comunicación. Adicionalmente, se incrementará el tráfico en la red, lo cual permitirá emular una situación de aumento de UE que consumen de forma simultánea el servicio de LVS. Es de resaltar el aporte presentado, ya que los estudios de comparación enfocados a la utilización del número de *PRB*, para este tipo de servicio, típicamente se realizan con el uso de métricas de QoS, usualmente con métricas de velocidad pico total (Mbps). Por el contrario, en esta validación se presentará el estudio comparativo a partir de parámetros de QoE estimada para un usuario final del servicio, lo cual constituye un insumo importante en la planeación y gestión de recursos de redes móviles inalámbricas de última generación.

6.1 Generalidades de la capa física de LTE

La interfaz radio de un sistema LTE definida por 3GPP, utiliza técnicas de acceso al medio, tanto para el canal descendente como para el canal ascendente. Para el canal descendente - *downlink*, LTE utiliza la técnica de acceso múltiple *OFDMA* (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) y para el canal ascendente - *uplink* utiliza *SC-FDMA* (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). Para ambos enlaces, las subportadoras presentan una separación fija de 15 KHz. El estándar 3GPP define hasta 40 posibles bandas de operación de trabajo en cualquiera de los modos de duplexación (división en frecuencia - FDD o división en el tiempo - TDD). Las técnicas de modulación empleadas por LTE, tanto para *downlink* como *uplink* son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM, lo cual depende de la capacidad del terminal móvil. Adicionalmente, si se utilizan técnicas de dominio espacial tales como MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) 2x2 con una canalización de 20 MHz, en teoría se puede alcanzar, a nivel de la capa física, un pico de velocidad de transmisión del orden de 150 Mb/s en *downlink* y de 75 Mb/s en *Uplink* [131]. En el Anexo B la Figura B.17 a la Figura B.20 se presentan los parámetros más relevantes de la tecnología LTE.

Un *PRB*, es definido como el mínimo elemento de información que puede ser asignado por el *eNB* a un terminal móvil. Un *PRB* ocupa 180 KHz de banda, lo cual equivale a 12 subportadoras equi-espaciadas 15 KHz entre ellas; para *OFDMA* y dependiendo de la longitud del prefijo cíclico, se transmiten 6 o 7 símbolos por cada *PRB*. La duración de un slot o ranura de tiempo para un *PRB* es de 0,5 ms. Ver Figura 6.1.

A manera de ejemplo, para una *PRB* se tienen 7 símbolos *OFDM* con 12 subportadores asociadas a cada uno de ellos; por lo tanto, se obtienen 84 elementos de recursos donde se pueden introducir símbolos *QPSK*, *16QAM* y *64QAM*. Al considerar *64QAM*, que corresponde a una modulación de alta eficiencia espectral, se utilizan 6 bits/símbolo, por lo tanto, en un *PRB* se pueden enviar 504 bits cada 0.5mseg, lo que es aproximado a 1Mbps. De acuerdo a la Tabla 6.1, en donde se definen el número de *PRBs* asignados de acuerdo a la canalización, para una canalización de 20 MHz, la cual utiliza 100 *PRBs*, en teoría se obtiene una velocidad pico de 100 Mbps.

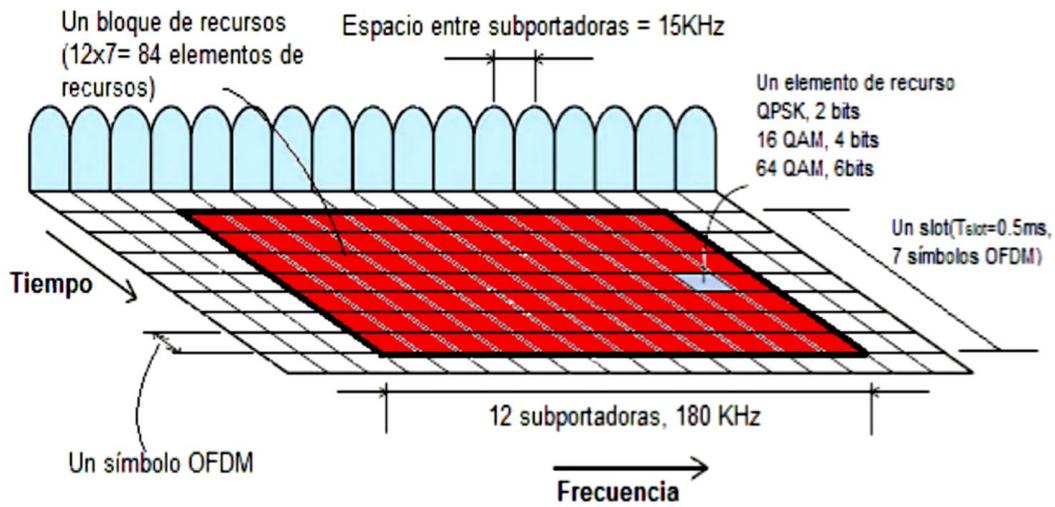


Figura 6.1. Bloque de recursos físicos: PRB [132]

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
PRB's	6	15	25	50	75	100

Tabla 6.1. Cantidad de PRBs Vrs. la canalización [131]

La Tabla 6.2 muestra en función de la canalización, las velocidades picos alcanzadas para las modulaciones 64QAM y QPSK. Adicionalmente, si se considera el sistema *MIMO*, las velocidades presentadas, para el caso de *MIMO 2x2*, podrían llegar a duplicarse.

Modulación	Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
64QAM	Velocidad pico Total (Mbps)	≈ 6	≈ 15	≈ 25	≈ 50	≈ 75	≈ 100
	Velocidad pico bruta de usuario (Mbps) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	≈ 5,1	≈ 12,8	≈ 21	≈ 42,5	≈ 63,7	≈ 85
	Velocidad pico Total (Mbps)	≈ 1,7	≈ 4,3	≈ 7,2	≈ 14,4	≈ 21,6	≈ 28,8

QPSK	Velocidad pico bruta de usuario (Mbps)						
	(15% de los recursos destinados a control y señalización)	≈ 1,4	≈ 3,6	≈ 6,1	≈ 12,2	≈ 18,3	≈ 24,4

Tabla 6.2. Velocidades pico y canalización [131]

6.2 Estimación de la QoE frente a la variación de parámetros de la capa física de LTE

Para realizar la estimación de la QoE del servicio de LVS en una red LTE emulada, se utiliza el sistema de emulación presentado en la sección 3, el cual fue validado mediante el contraste de resultados con un escenario real en la sección 3.3. Un usuario final del servicio que hace parte de una red LTE, utiliza el servicio de LVS mediante la reproducción de un video en vivo durante un periodo de 100 seg, para este caso se utiliza un vídeo de prueba con categoría A (video de una entrevista); la resolución del vídeo es de 480p (854x480), por lo cual se requiere, de acuerdo a la Tabla 3.7, un *bitrate* de 1,128 Mbps para cada *UE*. Los experimentos (test) se repite 10 veces con el fin de evitar singularidades inesperadas. Para cada prueba, se extraen los *KPI* de QoE (eventos de *stalling*, búfer inicial) y otros parámetros requeridos para aplicar el modelo de la ITU-T P.1203 mediante la herramienta computacional presentada en este trabajo doctoral, a partir de los cuales se estima la QoE en términos de MOS. En el sistema emulado LTE, se utiliza el modelo de propagación en exteriores *Nakagami-m* con $m=5$, modulación QPSK y el usuario se mueve con una velocidad de 1,38 m/s alejándose del eNB. (escenario de emulación 2). Durante la realización de los experimentos, se varía el número de *PRB* y la cantidad de número de usuarios *UE* que utiliza de forma simultánea el servicio. La variación de la cantidad de los *PRB* utilizados, se realiza de acuerdo a la canalización empleada en LTE, ver Tabla 6.1 y su configuración preliminar se realiza directamente en el *PC1* sobre el emulador *NS3*. En vista que el sistema de emulación presentado en la Figura 3.1 solo tiene disponibilidad para trabajar con un *UE*, es necesario emular el tráfico generado por otros usuarios que utilizarán el servicio de LVS de forma simultánea. Para el proceso

de emular el tráfico extra generado por otros UE, se utiliza el generador de tráfico de internet distribuido D-ITG (*Distributed Internet Traffic Generator*) [133], el cual es una plataforma capaz de producir tráfico a nivel de paquete como el generado en una red LTE y que se instala en el cliente y en el servidor del sistema de emulación; La Figura 6.2 muestra el esquema general del sistema de emulación presentado en esta sección.

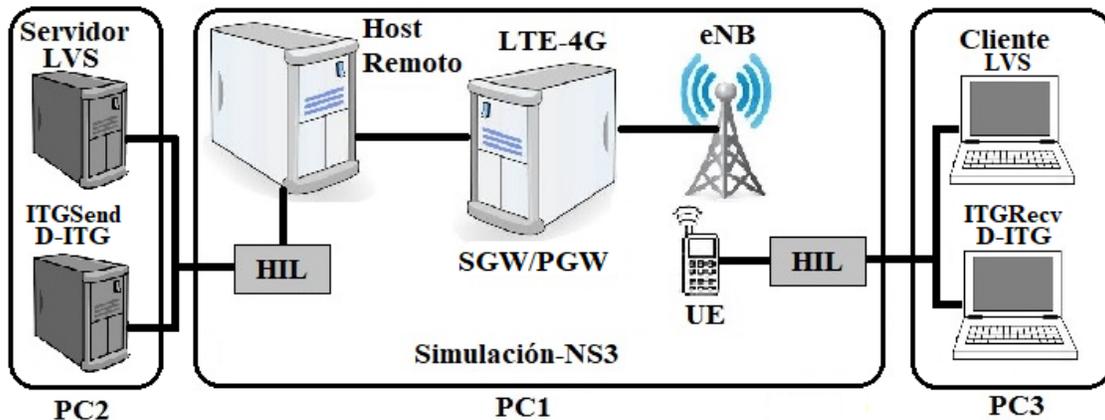


Figura 6.2. Esquema general del escenario de emulación y generador de tráfico

Las características principales de D-ITG son proporcionadas por ITGSend e ITGRecv. ITGSend es el componente responsable de generar tráfico hacia ITGRecv. Para la configuración del *D-ITG*, se muestra en la Figura 6.3 la captura de pantalla de la línea de comandos para el componente ITGSend, en donde se envía tráfico TCP a la dirección del cliente (para este caso 200.100.0.3) de forma uniforme (-u) entre 900 y 1000 Bps y 1000 paquetes durante 80 seg. Con esta configuración se obtiene un promedio de *bitrate* de 1000Bps x 8 x 1000 paquetes = 8 Mbps.

```
hector@hector-Inspiron-5420:~/D-ITG-2.8.1-r1023/bin$ ./ITGSend -T TCP -a 200.100.0.3 -u 900 1000 -C 1000 -t 80000 -l sender.log -x receiver.log
```

Figura 6.3. Configuración *D-ITG* para la generación de tráfico – *ITGSend*

La Figura 6.4 muestra un pantallazo de cómo se inicia la captura de los paquetes mediante *ITGRecv*, se observa que el componente *ITGRecv* queda en espera de los paquetes procedentes de un *ITGSend*. En este ejemplo, el *ITGRecv* puede recibir flujos de paquetes desde varios *ITGSend*.

```

andres-celis@andrescelis-VirtualBox:~/Descargas/D-ITG-2.8.1-r1023/bin$ ./ITGRecv
ITGRecv version 2.8.1 (r1023)
Compile-time options: bursty multiport
Press Ctrl-C to terminate

```

Figura 6.4. Configuración *D-ITG* para recepción de tráfico - *ITGRecv*

ITGSend e *ITGRecv* producen opcionalmente archivos de registro que contienen información detallada sobre los paquetes enviados y recibidos, estos se generan con el componente *ITGLog*, ver la captura de pantalla en la Figura 6.5. A partir de esta información se obtienen los parámetros de QoS.

```

ITGDec version 2.8.1 (r1023)
Compile-time options: bursty multiport
-----
Flow number: 1
From 200.100.1.3:50386
To 200.100.0.3:8999
-----
Total time = 100.179409 s
Total packets = 55979
Minimum delay = 0.087320 s
Maximum delay = 1.406196 s
Average delay = 0.399971 s
Average jitter = 0.003133 s
Delay standard deviation = 0.231535 s
Bytes received = 22082870
Average bitrate = 1763.465784 Kbit/s
Average packet rate = 558.787485 pkt/s
Packets dropped = 6 (0.01 %)
Average loss-burst size = 6.000000 pkt
-----

```

Figura 6.5. Resumen de la transmisión con el *D-ITG* utilizando el componente *ITGLog*

Adicionalmente, en el *PC1*, se instala el software *IPTraf* [134], que es un programa basado en consola que proporciona estadísticas de red, información de las conexiones TCP (estadísticas y la actividad de las interfaces), caídas de tráfico TCP y UDP, etc. La Figura 6.6 muestra la captura de pantalla de la actividad en las diferentes interfaces del *PC1*. Esta herramienta permite validar en el *PC1* los valores presentados en la Tabla 6.3

```

IPTraf
-----
Iface      Total      IP      NonIP    BadIP    Activity
-----
eth0       1022269    1022269    0        0        4163,20 kbits/sec
eth1       908711     908711     0        0        4248,00 kbits/sec
tap0       1022076    1022076     0        0        4163,20 kbits/sec
tap1       1047999    1047999     0        0        4289,80 kbits/sec
lo         3968       3968        0        0         0,00 kbits/sec
    
```

Figura 6.6. Monitoreo de interfaces del PC1 a través de IPTraf

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al estimar la QoE objetiva considerando la variación de *PRB* y número de usuario. Para la realización de los diferentes test, se tiene en cuenta lo siguiente: *i)* inicialmente se considera un solo *UE* que hace uso del servicio de *LVS*, *ii)* se aumenta el número de *UEs* dentro del sistema, para lo cual se incrementa el tráfico generado con el D-ITG. Como ejemplo para el caso de tres *UE*, se genera el tráfico requerido para dos *UE* a través del D-ITG y el tráfico del restante *UE* es el generado por el *UE-LVS* de acuerdo a la distribución presentada en la Tabla 6.3. *iii)* finalmente se varía la cantidad de *PRB* de acuerdo al esquema de canalización para LTE.

La resolución del video definida para las pruebas de validación es de 480p, se requiere un *bitrate* de 1,128 Mbps por *UE*; la Tabla 6.3 establece las diferentes configuraciones de *bitrate* en el sistema para representar la presencia de varios *UE* que utilizan simultáneamente el servicio de *LVS*.

Nro. UEs	UE DITG Mbps	UE-LVS Mbps	Total Mbps
1	0	1,128	1,128
2	1,128	1,128	2,256
3	2,256	1,128	3,384
4	3,384	1,128	4,512
5	4,512	1,128	5,64
6	5,64	1,128	6,768
7	6,768	1,128	7,896
8	7,896	1,128	9,024
9	9,024	1,128	10.152
10	10.152	1,128	11.28

Tabla 6.3. Tráfico generado para diferente número de *UE* en el sistema de emulación

Los experimentos (test) se repiten 10 veces con el fin de evitar singularidades inesperadas. Finalmente, al extraer las métricas necesarias de eventos de *stalling* de los diferentes test, se aplica el modelo ITU-T P.1203 implementado en Matlab para estimar la QoE en términos de MOS para cada transmisión de video. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los diferentes test realizados; se muestran los valores promedios de QoE y las barras de error representan el intervalo de confianza del 95%.

Las Figura 6.7 y Figura 6.8 muestran los *KPI* de QoE medidos para los diferentes test. La Figura 6.7 despliega la duración y cantidad de eventos de *stalling* de acuerdo a la cantidad de *PRB* y número de usuarios que utilizan el servicio de LVS en una red LTE emulada. El comportamiento de los resultados para la duración de los eventos de *stalling* son los esperados; a medida que se disminuye el número de *PRB* aumenta la duración de los eventos de *stalling*, este comportamiento es producido por el hecho que se asigna menor cantidad de recursos para atender el servicio de LVS establecido. Para el caso de utilizar 100 *PRB*, cuando un *UE* utiliza el servicio de LVS se observa que no se presentan eventos de *stalling*; por el contrario, cuando en el sistema interactúa de forma simultánea cinco *UE*, se aprecia la aparición de eventos de *stalling* y su respectiva duración. Para el caso del uso de 6 *PRB*, se observa como se incrementa la cantidad y número de eventos de *stalling* a medida que se incrementa el número de usuarios. Los resultados observados en la cantidad y duración de eventos de *stalling* tendrán, como fue demostrado en el capítulo 5, el efecto correspondiente en la estimación final de la QoE.

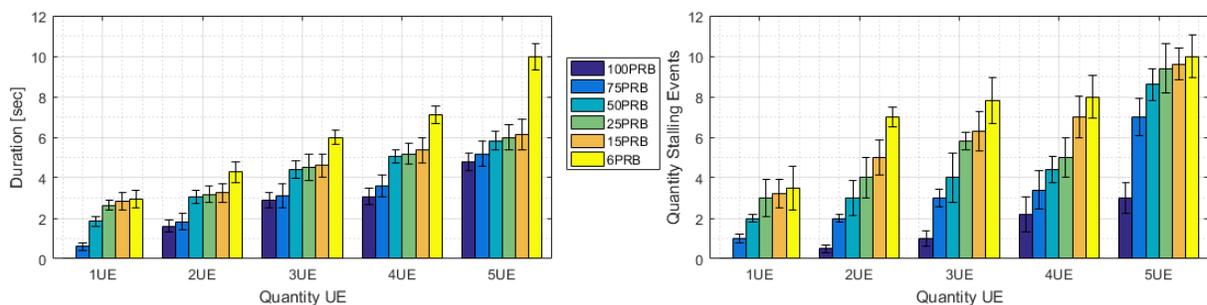


Figura 6.7. *KPIs* (duración y cantidad) de eventos de *stalling*

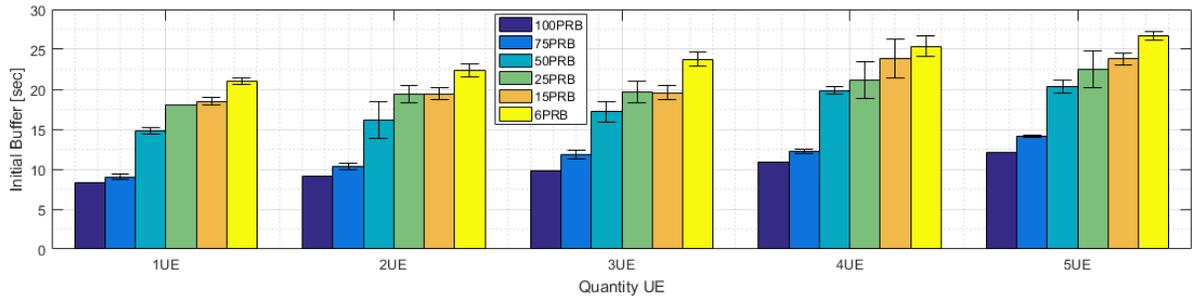


Figura 6.8. KPI (búfer inicial) de eventos de stalling

Por otro lado, en el comportamiento de los *KPI* (búfer inicial) de eventos de *stalling*, presentados en la Figura 6.8, se aprecia que el búfer inicial presenta una variación muy baja con el incremento del número de *UE* que utilice el sistema de forma simultánea, este valor se incrementa solo con la disminución en la cantidad de *PRB* utilizados, lo cual se traduce en menor cantidad de recursos asignados para atender el servicio de LVS.

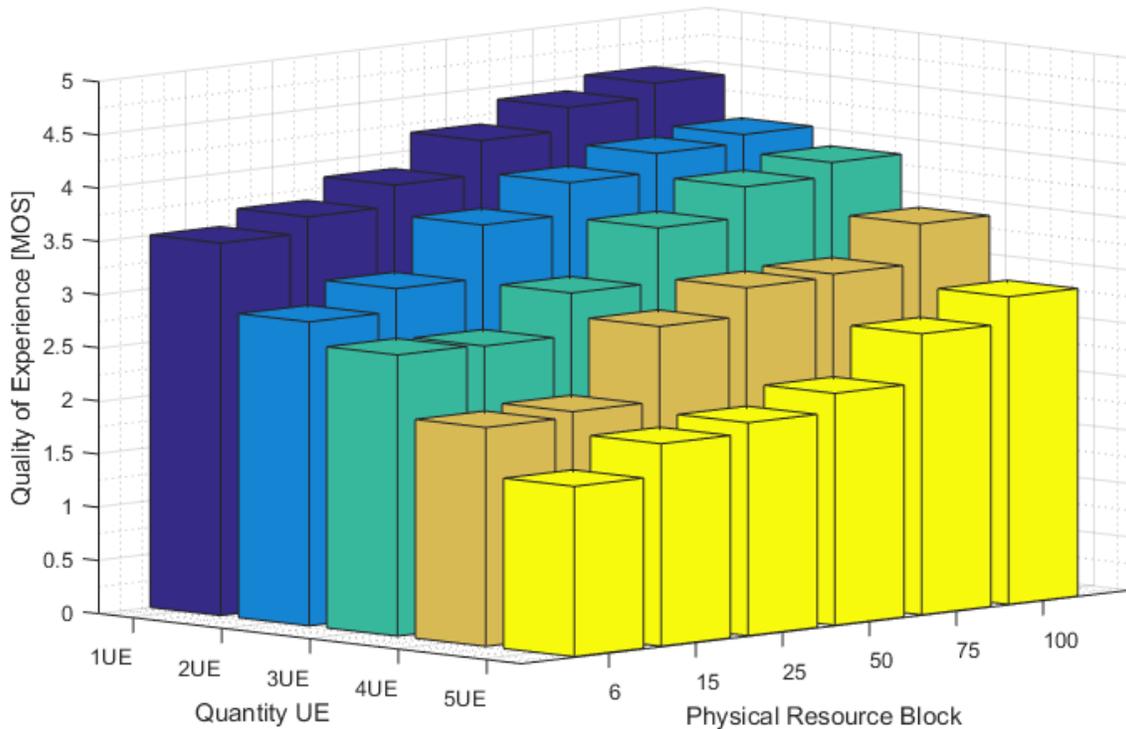


Figura 6.9. Estimación de QoE en función de cantidad de UE y PRB

La Figura 6.9 muestra la estimación de la QoE obtenida con la herramienta diseñada en este trabajo de investigación. Se aprecia en la Figura 6.9 como la estimación de la QoE es la mejor cuando se utiliza un solo *UE* y 100 *PRB*. Por el contrario, cuando se utilizan cinco *UE* y 6 *PRB* se observa el peor desempeño. De acuerdo a los resultados obtenidos, para la herramienta de emulación del servicio de LVS en redes LTE, se obtiene una estimación de la QoE mayor a 4 (buena) cuando de forma simultánea, hasta dos *UE* consumen el servicio de LVS con un mínimo 75 *PRB*. Se aprecia, además, una estimación de la QoE de “regular” (3 - 3,9) cuando tres *UE* utilizan de forma simultánea el servicio de LVS con un mínimo de 50 *PRB*, este valor de la estimación también se presenta para cuatro *UE* con el uso de 100 *PRB*. A partir de estos resultados, la estimación de QoE es considerada como “pobre” (2 - 2,9) para el servicio de LVS.

6.3 Conclusiones preliminares.

Con el desarrollo de la actividad presentada en esta sección, y de acuerdo a los resultados obtenidos, se pueden realizar las siguientes apreciaciones.

1. Se presenta un estudio comparativo que involucra elementos claves de la capa física de la arquitectura LTE, como es el caso de la asignación de los *PRB*, número de *UE* y la estimación de la QoE para el servicio de LVS en una red LTE para las condiciones y configuración particular presentada en el escenario de emulación. De donde, a partir de la estimación de la QoE, para diferentes cantidades de *PRB*, se valida la cantidad de usuarios que pueden acceder de forma simultánea al servicio de LVS en una red LTE y que obtengan una estimación mínima de QoE, “regular” (3-3.9) o mayor, que permita definir la viabilidad del servicio por parte del usuario final.
2. La herramienta de emulación integrada con el generador de tráfico utilizada en esta investigación, presenta la posibilidad de emular el tráfico presente en el sistema cuando varios *UE* utilizan de forma simultánea el servicio de LVS. Lo anterior, propicia realizar estudios de análisis y capacidad de usuarios sobre la red utilizada. Debido al modelo de configuración adoptado por la herramienta de emulación, en la cual sólo un *UE* puede reproducir el servicio de vídeo, la

extracción de los KPI de QoE se realiza solamente para este UE, y por ende la estimación de la QoE.

3. Al aplicar el modelo de estimación de QoE propuesto y que se encuentra basado en la recomendación ITU-T P.1203, se aprecia que con la herramienta de emulación utilizada, empleando 100 PRB y con una modulación QPSK, es posible prestar el servicio de LVS hasta cuatro UE de forma simultánea, con una estimación de QoE en el rango de 3 - 3,9, la cual se considera como “regular”. A partir de ese número de UE, la estimación de QoE pasa a ser “pobre” (2-2,9). La anterior situación, brinda la posibilidad de realizar estudios y comparaciones de tráfico, hasta con cuatro UE, donde se pueda garantizar que efectivamente el usuario final se encuentre conforme con la calidad de video obtenida.
4. De los valores presentados en la Tabla 6.2, se observa que la velocidad pico alcanzada por un sistema LTE, cuando se utilizan 100 PRB y una modulación QPSK, es del orden de los 24,4 Mbps; de acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 6.3, el sistema LTE podrían soportar aproximadamente 21 usuarios que utilicen de manera simultánea el servicio de LVS con una resolución de video de 480p. Las anteriores cifras son estimadas teniendo en cuenta métricas de QoS, específicamente la velocidad pico, las cuales no consideran la calidad del video percibida por el usuario final. De acuerdo a los estudios realizados en esta sección, donde se estima la QoE, se observa que el número de usuarios que hacen uso del servicio de LVS de forma simultánea y que presentan una satisfacción con una estimación de la calidad de mínimo “regular” (3 – 3,9 de la MOS) es del orden de cuatro usuarios. Con el anterior análisis, se deja en evidencia el verdadero potencial de las estimaciones de la QoE con respecto a las mediciones de parámetros de QoS y su utilidad para los operadores y prestadores de servicios de telecomunicaciones que buscan ofrecer servicios con un alto grado de satisfacción por parte del usuario final.

Capítulo séptimo

7. Conclusiones y trabajo futuro

Según las revisiones literarias realizadas al estado del arte en el campo de la prestación de servicios de streaming de video en redes LTE, específicamente el servicio en vivo – LVS, producto del análisis sistemático presentado en el marco de antecedente, sección 2.2 y el anexo A.8, y de acuerdo a los resultados, se observa que a diferencia de las propuestas analizadas, en el presente trabajo se reúnen todas las características planteadas en los objetivos de esta tesis doctoral, los cuales se enfocan en los modelos de tráfico, metodologías de evaluación de la calidad del vídeo y el servicio de video streaming. En relación con lo anterior, se destaca que el estudio presentado en este trabajo doctoral, presenta un modelado de tráfico para el servicio de LVS en redes LTE, que puede ser utilizado como una herramienta de validación que permita a los proveedores de servicios y operadores de redes de telecomunicaciones probar alternativas de solución de los problemas de streaming de video que contribuya al mejoramiento de la estimación de la QoE del servicio estudiado. Los resultados presentados, están sustentados en validaciones y estudios de caso que confrontan los escenarios emulados con los reales, lo cual le aporta suficiente rigor y veracidad.

Con respecto al modelado de tráfico, en esta tesis doctoral se presenta un modelado estadístico de tráfico de las componentes de audio y video que conforman el servicio de LVS de una red LTE emulada, el cual surge a partir de trazas de tráfico reales. Adicionalmente, el modelado del tráfico de video realizado, presenta una descripción muy particular para cada uno de los escenarios de prueba definidos; de lo cual se puede afirmar que el modelo encontrado depende de las condiciones propias de cada

escenario y que se presenta un modelado estadístico de tráfico de las componentes de audio y video que conforman el servicio de LVS de una red LTE emulada, el cual surge a partir de trazas de tráfico reales.

Por otro lado, con respecto al modelado visto desde el enfoque de emulación, con el uso de escenarios de experimentación que involucran elementos reales, y debido a que en la actualidad hay un gran interés de parte de las comunidades académica y científica en el uso y desarrollo de plataformas de prueba de sistemas de comunicaciones que consideren este tipo de condiciones, se considera que los resultados presentados en este trabajo doctoral serán de gran interés y aporte al estado de la técnica. Es por eso que, respecto a los diferentes escenarios de experimentación estudiados en esta tesis doctoral, y para las condiciones preestablecidas, se observa que para la implementación del servicio de LVS en una red LTE, en un ambiente de propagación indoor, el modelo de propagación que aporta mayor fidelidad con respecto a los resultados obtenidos en un escenario real es el modelo de propagación *Nakagami-m* con $m=1$. De igual forma, para ambientes de propagación outdoor, el modelo de propagación que más se ajusta con los datos reales es el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=5$. Por otro lado, de acuerdo al análisis de resultados presentados en esta tesis, se puede afirmar que el escenario de experimentación propuesto, presenta un alto grado de confiabilidad y repetitividad de los experimentos debido al grado de similitud alcanzado, lo cual es avalado mediante la comprobación de la hipótesis nula planteada para la prueba estadística ANOVA.

En cuanto a la estimación de la QoE, en este trabajo doctoral se ha presentado una herramienta para la implementación funcional del modelo ITU-T P.1203. Esta implementación ha sido validada para el uso de la estimación objetiva de QoE de servicios multimedia que utilicen un protocolo de transporte fiable (TCP), y que utilicen técnicas de transmisión progresiva y adaptativa. De acuerdo a los resultados presentados en este trabajo, se logra establecer, en función de la QoE y algunas KPI de QoE, una comparación del desempeño de las técnicas de streaming de descarga progresiva y adaptativa, para los protocolos RTPM y DASH respectivamente, frente variaciones controlada de algunos parámetros de QoS, tales como *Interpacket delay*, *Jitter*, *Throughput* y *Packet loss*. Con respecto a las técnicas de streaming adaptativo, se presenta un estudio desde el enfoque de la QoE y algunas KPI de QoE, en el cual se analiza el desempeño de las diferentes técnicas de streaming adaptativas (DASH,

HLS, HDS y HSS) frente a las variaciones controladas de los parámetros de QoS *Interpacket delay* y *Packet loss*. Se destaca del estudio, los resultados obtenidos de la técnica DASH frente a las otras técnicas.

Mediante la utilización de la herramienta diseñada para la estimación de la QoE, se presenta un estudio comparativo que involucra elementos claves de la capa física de la arquitectura LTE, asignación de PRB y número de UE, para el servicio de LVS en una red LTE para las condiciones y configuración particular. De donde, a partir de la estimación de la QoE, para diferentes cantidades de PRB, se valida la cantidad de usuarios que pueden acceder de forma simultánea al servicio y que alcanzan una estimación de QoE que permita que el servicio sea aceptado por el usuario final. De los resultados obtenidos, se aprecia que, con la herramienta de emulación utilizada, empleando 100 PRB y con una modulación QPSK, es posible prestar el servicio de LVS hasta cuatro UE de forma simultánea, con una estimación de QoE en el rango de 3 - 3,9, la cual se considera como “regular”. A partir de ese número de UE, la estimación de QoE pasa a ser “pobre” (2-2,9). La anterior situación, brinda la posibilidad de realizar estudios y comparaciones de tráfico, hasta con cuatro UE, donde se pueda garantizar que efectivamente el usuario final se encuentre conforme con la calidad de video obtenida. Este estudio es de gran interés, ya que pone en manifiesto el verdadero potencial de las estimaciones de la QoE con respecto a las mediciones de parámetros de QoS y su utilidad para los operadores y prestadores de servicios de telecomunicaciones que buscan ofrecer servicios con un alto grado de satisfacción por parte del usuario final.

De lo anterior, y teniendo en cuenta el desarrollo y resultados presentados en este trabajo, se resumen a continuación las contribuciones de la presente tesis. Adicionalmente, se presentan las publicaciones y trabajos de grado derivados de esta investigación, así como las posibles investigaciones que se derivan de este trabajo.

7.1 Resumen de las contribuciones

De acuerdo al desarrollo y resultados presentado en este trabajo doctoral, se presentan las principales contribuciones obtenidas.

7.1.1 Contribuciones a nivel de modelado.

Las contribuciones a nivel de modelado, se derivan del cumplimiento del objetivo 1. A continuación se resumen las contribuciones de este apartado:

- El Modelado del servicio LVS en una red LTE, desde un enfoque de ambientes de emulación. Para la construcción de este modelo, se construye en este trabajo doctoral un escenario de experimentación, que considera condiciones reales para el servicio de LVS en redes LTE. El escenario propuesto, es validado para diferentes entornos de emulación en ambientes indoor y outdoor bajo parámetros de QoE. Adicionalmente, para el escenario propuesto, se definen los parámetros de configuración utilizados tales como: modelos de propagación, potencias de operación, configuración general de la capa física, tipos de antenas utilizadas y diferentes ajustes de codificación para audio y video.
- Se presenta un desarrollo que admite que el simulador de redes NS3-LENA pase de un ambiente de simulación a un ambiente de emulación mediante el manejo de tráfico y dispositivos reales. Esto se logra mediante la adecuación del código de NS3-LENA que permita la incorporación de un servidor de vídeo y la posibilidad de reproducir y monitorear el servicio de LVS en un dispositivo real. Con lo anterior, se amplía el espectro de utilización del simulador NS3.
- Se desarrollan, a partir del reproductor de Wowza Streaming Engine, reproductores del servicio de LVS para las diferentes técnicas de Streaming adaptativo estudiadas. Adicionalmente, para el reproductor de Streaming basado en DASH, se crea una función que permita visualizar los cambios de resolución asignados al reproductor.
- Se configura, con la ayuda del analizador de comunicaciones de banda ancha de Rohde & Schwarz modelo CMW500 un entorno real de comunicaciones para el servicio LVS, al cual se le configura un servidor real del servicio sobre una red LTE, tanto en ambientes de interiores como de exteriores.
- El Modelado del servicio LVS en una red LTE, desde un enfoque analítico. Para el desarrollo de este modelo, se presenta el proceso de caracterización de tráfico que involucra fases de definición de escenarios de experimentación, captura de trazas tráfico, análisis de tipos de *slíces* que conforman el video (*Grup Of Pictures - GOP*) y el audio, específicamente los tiempos de llegada y los tamaños. Como resultado final del modelo estadístico, se presentan las PDF que describen el comportamiento de cada una de las componentes del servicio

- Implementación de un analizador sintáctico. Es una herramienta software diseñada en Matlab y que se encuentra disponible en línea para su descarga. El analizador sintáctico contribuye con el proceso de extracción, identificación de los *slice* (audio y video) y la clasificación del tipo de *GOP* de video (I, P o B) necesarios para la definición del modelo estadístico, el cual es una actividad compleja que requiere un considerable esfuerzo en trabajo y tiempo.
- Se presenta una herramienta software diseñada en Matlab, y que se encuentra disponible en línea para su descarga, que permite de forma automática realizar la prueba de bondad y ajuste de Kolmogórov-Smirnov en conjunto con la herramienta *dfittool* de Matlab.

7.1.2 Contribuciones a nivel de metodologías de evaluación de la calidad del vídeo

Las contribuciones a nivel de metodologías de evaluación de la calidad del vídeo, se derivan del cumplimiento de los objetivos 2 y 3. A continuación se resumen las contribuciones de este apartado:

- Estimación objetiva de la QoE para el servicio de LVS. En el proceso de estimación de la calidad de la experiencia – QoE para el servicio de LVS en una red LTE, se desarrolla a partir de la recomendación ITU-T P.1203, una herramienta software implementada en Matlab, la cual de forma detallada describe la metodología para estimar la QoE objetiva para el servicio mencionado. Lo anterior permite subsanar en cierto grado los inconvenientes detectados en la complejidad de la aplicación de la Rec. ITU-T P.1203. La herramienta propuesta es validada mediante comparaciones, para unas condiciones particulares, de los valores estimados de la QoE obtenidos en una prueba subjetiva (encuestas) y los resultados obtenidos de la estimación de QoE propuesta por Robitza *et al* en [60].
- Análisis del impacto de diferentes KPI de QoS y su relación con la estimación de la QoE. Este aporte presenta los valores numéricos para las métricas de QoS, específicamente retardos (*Interpacket delay*) y pérdida de paquetes (PLR) con los cuales se obtiene valores específicos de QoE. Adicionalmente, se analizan el comportamiento de los KPI de QoS (eventos de *stalling* y búfer) frente a las variaciones controladas de *Interpacket delay* y PLR.

- Análisis del comportamiento de las diferentes técnicas de Streaming adaptativo: DASH, HLS, HDS y HSS; en la estimación objetiva de la QoE.

7.2 Trabajo Futuro

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

- Relación de los KPI de QoE con la estimación objetiva de QoE para el servicio de streaming. En esta tesis se observa que existe una relación directa entre la cantidad y duración de los eventos de *stalling* y la estimación objetiva de la QoE para el servicio estudiado. Sin embargo, aunque se observa esta relación, no se analiza de manera profunda los efectos que estos eventos producen en la QoE estimada para el servicio de LVS.
- Estimación automática de eventos de *stalling*. En esta tesis, para el registro de los eventos de *stalling* (número y duración, búfer inicial) se utilizó el método de observación directa, en el cual se van registrando los eventos de *stalling* a medida que se reproduce el vídeo por parte del cliente. Este proceso fue bastante tedioso y está condicionado a la aparición de errores humanos en el registro. Por lo anterior se propone realizar un sistema de detección automática de los eventos de *stalling* que sirvan para aplicar la Rec. ITU-T P.1203 y que tenga como punto de partida las trazas de tráfico capturadas en formato *pcap* con el software de captura de tráfico *wireshark*.
- Utilizar las PDF encontradas en este trabajo, para realizar diferentes estudios de comportamiento del servicio de LVS en redes LTE. Con la ayuda de programas de simulación de redes, programar las diferentes PDF encontradas en esta tesis de las diferentes componentes de video y audio, las cuales se obtienen de escenarios reales, para realizar análisis y estudios enfocados al comportamiento y capacidad de las redes LTE. Lo anterior brinda la posibilidad que muchos de los supuestos utilizados para la generación de tráfico en las simulaciones sean reemplazados por datos reales y así obtener resultados más fiables y que parten de situaciones reales.

- Extender los estudios y escenarios de emulación a otras tecnologías de acceso, tales como redes WiFi, LTE-A Pro. Adicionalmente, considerar otros códec como H.265.

7.3 Aportes principales

Como producto de esta tesis doctoral, los trabajos y aportaciones preliminares han sido publicados en *proceedings* de varios congresos y revistas nacionales e internacionales. Se incluyen además trabajos de grado y pasantías, que han contribuido a la consecución de los objetivos de este trabajo. A continuación, se detallan las contribuciones.

7.3.1 Publicaciones

Revistas

- H.F. Bermúdez, J.L. Arciniegas, E. Astaiza, State of the art of QoE assessment methods, and emulation environments for the video service in LTE networks, *Entre Cienc. E Ing.* 10 (2016) 66–75.
Categoría Colciencias: B (Vigencia: 15 de septiembre 2017).

Este artículo presenta una revisión de los métodos utilizados para medir la QoE y la QoS para servicio de vídeo usando técnicas de videostreaming a través de un proveedor de servicio de internet. Además, se presenta la tecnología de acceso de radio – RAN Long Term Evolution - LTE como la tecnología inalámbrica con mayor probabilidad de utilización en los próximos años, para lo cual se comparan las herramientas de desarrollo para el manejo de plataformas de emulación para sistemas LTE.

- Bermudez, H.-F., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., Campo, W. Y., & Cano, M.-D. (2019). Statistical validation of an LTE emulation tool using live video streaming over reliable transport protocols. *Telecommunication Systems*, 71(3), 491–504. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0521-6>
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 1,707 (Q3), category TELECOMMUNICATIONS, position 54/88.

En este artículo se valida el modelo de propagación para ambientes externos que se pueden utilizar para realizar estudios precisos de caracterización del tráfico del servicio LVS en redes LTE utilizando una herramienta de emulación. La validación se realiza bajo parámetros de QoS a través de un análisis estadístico de varianza (ANOVA), comparando los resultados obtenidos en un escenario emulado LTE con los obtenidos en un banco de pruebas LTE real.

- Bermudez, H.-F., Martinez-Caro, J.-M., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., & Cano, M.-D. (2019). Live video-streaming evaluation using the ITU-T P.1203 QoE model in LTE networks. *Computer Networks*, 165, 106967. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106967>
Categoría Colciencias: A1 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 3,030 (Q1), category COMPUTER SCIENCE, HARDWARE & ARCHITECTURE position 13/53

En este artículo se presenta una implementación funcional de la Rec. UIT-T. P.1203 y su validación, así como las pautas para su aplicación. Como estudio de caso práctico, se evalúa el rendimiento de un servicio de LVS a través de una red LTE. Se comparan los resultados de QoE de dos bancos de pruebas diferentes, reales y emulados, y dos protocolos de transporte de video basados en TCP, DASH y RTMP. De los resultados, se obtiene que *Nakagami-m* con $m=5$ es el modelo de propagación más adecuado para ser utilizado en la emulación de escenarios LTE al aire libre. Adicionalmente, se concluye que el número de eventos de *stalling* es el factor con mayor importancia en la estimación de QoE proporcionada por el modelo.

- Bermudez, H.-F., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., Campo, W. Y., & Cano, M.-D. (2019). Study of Indoor Propagation Models in an Emulated LTE Network. Article in Press. DOI: 10.1049/iet-com.2019.0365
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2019 - Dic 2020).
Impact Factor: 1,779 (Q3), category ELECTRICAL & ELECTRONIC ENGINEERING, position 153/266

En este artículo se realiza una caracterización integral de los principales modelos de propagación utilizados por los sistemas de emulación típicos. Los resultados logrados utilizando modelos de propagación en interiores, mediante

la herramienta de simulación NS3. Este estudio se centra en un servicio de transmisión de video en vivo, considerando los protocolos de transmisión RTMP y RTSP. A partir de los resultados, se demuestra que solo uno de los modelos de propagación en estudio puede equipararse con un rendimiento real del sistema LTE.

- W.Y. Campo, H.-F. Bermudez, E. Astaiza, Characterization of traffic of the video streaming service based on lexical analyzers, *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* 26 (2018) 448–458. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000300448>
Categoría Colciencias: A2 (Vigencia: Ene 2018 - Dic 2018).
SJR: 0,18 – Q2 (2018), H Index 8

Este artículo presenta los modelos conceptuales del servicio y un analizador léxico cuya función es la extracción automática de los diferentes marcos de los flujos de tráfico y la identificación de los procesos de interactividad. A través del analizador léxico, se extrae la información de cada uno de los componentes del servicio, como las tramas I, P y B; y también lo es el componente de audio.

Proceedings

- H.-F. Bermudez, Traffic Model for LVS in LTE Mobil Networks with QoE. In proceeding of 2016 IEEE 11th Colombian Computing Conference, 2016. <http://doi.org/10.1109/ColumbianCC.2016.7750797>
- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L.Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2017). Performance Validation of NS3-LTE Emulation for Live Video Streaming under QoS Parameters. In In proceeding of the 13th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, (pp. 300-307), Rome, Italy. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115836>
- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L.Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2018). Comparative Study of Adaptive Streaming Techniques in LTE Networks Using QoE Metrics. In proceeding of 2018 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI) (pp. 1–6), Bogotá, Colombia.

<https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587101>

- H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J. L. Arciniegas, W. Y. Campo & M.-D. Cano, (2018). Análisis de Técnicas de Streaming Adaptativo en Entornos LTE mediante ITU-T P.1203, in 2018 IV Workshop QoS, QoE en Comunicaciones Multimedia (QQCM'18), Zaragoza, Spain.

7.3.2 Trabajos de grado

- Participación como director en el trabajo de grado de maestría titulado: “Estudio del servicio de videostreaming sobre una red LTE para la estimación de QoE” desarrollado por el estudiante Julio Ernesto Cárdenas. Maestría en Ingeniería. Universidad del Quindío. Trabajo en desarrollo.
- Participación como asesor en el trabajo de grado de pregrado titulado: “Modelo de tráfico para el análisis del servicio IPTV soportado por una red WiFi” desarrollada por los estudiantes Nicolás López y Bryan Fernando Diaz. Programa de Ingeniería Electrónica. Universidad del Quindío. 2017
- Participación como asesor en el trabajo de grado de pregrado titulado: “Automatización del proceso de análisis de tráfico de videostreaming mediante la construcción de una herramienta basada en software libre” desarrollada por los estudiantes Jhonatan Erick Taborda Ramírez y Carlos Mario Montes Reyes. Programa de Ingeniería Electrónica. Universidad del Quindío. 2015

7.3.3 Pasantías

- Pasantía internacional en la Universidad Politécnica de Cartagena – UPCT (España), bajo la dirección de la Dra. María Dolores Cano B., marzo 2017 – Julio de 2018.

Bibliografía

- [1] Ericsson Mobility Report June 2019, Ericsson.Com. (2019). <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2019> (accessed July 26, 2019).
- [2] S. Fowler, J. Sarfraz, M.M. Abbas, E. Bergfeldt, V. Angelakis, Evaluation and prospects from a measurement campaign on real multimedia traffic in LTE vs. UMTS, in: IEEE, Aalborg, 2014: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/VITAE.2014.6934475>.
- [3] A. Reaz, D. Murayama, K. Suzuki, N. Yoshimoto, G. Kramer, B. Mukherjee, Synthetic traffic generation for streaming video to model IPTV, in: IEEE, 2011: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ANTS.2011.6163638>.
- [4] J. Heidemann, K. Obraczka, J. Touch, Modeling the performance of HTTP over several transport protocols, IEEEACM Trans. Netw. TON. 5 (1997) 616–630. <https://doi.org/10.1109/90.649564>.
- [5] jbocharov, Smooth Streaming Transport Protocol, (2008). <https://docs.microsoft.com/en-us/iis/media/smooth-streaming/smooth-streaming-transport-protocol> (accessed June 3, 2018).
- [6] HTTP Live Streaming (HLS) - Apple Developer, (n.d.). <https://developer.apple.com/streaming/> (accessed June 3, 2018).
- [7] Adobe HTTP Dynamic Streaming (HDS) Technology Center | Adobe Developer Connection, (n.d.). <https://www.adobe.com/devnet/hds.html?origref=https%3A%2F%2Fwww.google.es%2F> (accessed June 3, 2018).
- [8] MPEG Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (MPEG-DASH), (n.d.). <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-dash> (accessed June 3, 2018).
- [9] J. Liu, X. Tao, J. Lu, QoE-Oriented Rate Adaptation for DASH With Enhanced Deep Q-Learning, IEEE Access. 7 (2019) 8454–8469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2889999>.
- [10] Y.-C. Chen, D. Towsley, R. Khalili, MSPlayer: Multi-Source and multi-Path LeverAged Youtuber, in: ACM, 2014: pp. 263–270. <https://doi.org/10.1145/2674005.2675007>.
- [11] A. Aloman, A.I. Ispas, P. Ciotirnae, R. Sanchez-Iborra, M.D. Cano, Performance Evaluation of Video Streaming Using MPEG DASH, RTSP, and RTMP in Mobile Networks, in: 2015 8th IFIP Wirel. Mob. Netw. Conf. WMNC, 2015: pp. 144–151. <https://doi.org/10.1109/WMNC.2015.12>.
- [12] R. Sanchez-Iborra, M.-D. Cano, J. Garcia-Haro, Revisiting VoIP QoE assessment methods: are they suitable for VoLTE?, Netw. Protoc. Algorithms. 8 (2016) 39–57. <https://doi.org/10.5296/npa.v8i2.9123>.
- [13] M. Seufert, N. Wehner, P. Casas, Studying the Impact of HAS QoE Factors on the Standardized QoE Model P.1203, in: 2018 IEEE 38th Int. Conf. Distrib. Comput. Syst. ICDCS, 2018: pp. 1636–1641. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2018.00185>.

- [14] F. Abdurrahman, N.R. Ahmed, E. Ali, M. Mohamed, N. Amr, R. Mohamed, S.I. Ahmed, Real Time Video Streaming over NS3 based Emulated LTE Networks, in: 2014: pp. 659–663.
- [15] T. Molloy, Z. Yuan, G.-M. Muntean, Real time emulation of an LTE network using NS-3, in: 25th IET Ir. Signals Syst. Conf. 2014 2014 China-Irel. Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ISSC 2014CIICT 2014, Limerick, 2014: pp. 251–257. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0694>.
- [16] W.Y. Campo, Modelo de Tráfico para Servicios Interactivos de una Comunidad Académica Virtual, con contenidos de Audio y Video de Alta Calidad, Tesis Doctoral, Universidad del Cauca, 2014.
- [17] W.Y. Campo, J.L. Arciniegas, R. García, D. Melendi, Análisis de Tráfico para un Servicio de Vídeo bajo Demanda sobre Redes HFC usando el Protocolo RTMP, Inf. Tecnológica. 21 (2010) 37–48. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000600006>.
- [18] P. Yin, A. Criminisi, J. Winn, I.A. Essa, Bilayer Segmentation of Webcam Videos Using Tree-Based Classifiers, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 33 (2011) 30–42. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.65>.
- [19] ITU-T Recommendation, P.1203 : Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport - Video quality estimation module, (2017). <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.1203.1-201710-I> (accessed February 2, 2019).
- [20] J. Cegarra, Metodología de La Investigacion Cientifica y Tecnologica, Díaz de Santos, Madrid, 2004. <http://es.scribd.com/doc/178580663/Metodologia-de-La-Investigacion-Cientifica-y-Tecnologica#scribd>.
- [21] O.B. Maia, H.C. Yehia, L. de Errico, A concise review of the quality of experience assessment for video streaming, Comput. Commun. 57 (2015) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.11.005>.
- [22] Cisco, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014–2019 White Paper, Cisco. (2015). http://cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html (accessed September 8, 2018).
- [23] H.F. Bermúdez, J.L. Arciniegas, E. Astaiza, State of the art of QoE assessment methods, and emulation environments for the video service in LTE networks, Entre Cienc. E Ing. 10 (2016) 66–75. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-83672016000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es (accessed May 27, 2017).
- [24] [82] IPTV vocabulary of terms, (n.d.). <https://www.itu.int/md/T05-FG.IPTV-DOC-0082> (accessed October 29, 2019).
- [25] ITU-T Study Group 12, Definition of Quality of Experience (QoE), (2007). <https://www.itu.int/md/T05-FG.IPTV-IL-0050/en> (accessed October 19, 2019).
- [26] T. Rahrer, R. Fiandra, S. Wright, Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements - Technical Report TR-126, Architecture & Transport Working Group, 2006.
- [27] A. Moustakis, QoE estimation for Adaptive Video Streaming over LTE Networks, Thesis, National and Kapodistrian University of Athens, 2017.

- [28] D. Ghadiyaram, J. Pan, A.C. Bovik, Learning a Continuous-Time Streaming Video QoE Model, *IEEE Trans. Image Process.* 27 (2018) 2257–2271. <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2790347>.
- [29] ITU-T Recommendation, P.1203.1: Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport - Video quality estimation module, (2017). <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.1203.1-201710-l> (accessed February 2, 2018).
- [30] I. Gomez, P. Sutton, A. Nag, A. Selim, L. Doyle, V. Ramachandran, A. Kokaram, A software radio LTE network testbed for video quality of experience experimentation, in: 2017 Ninth Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2017: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965667>.
- [31] J.C. Cuellar, Modelo para la medición de QoE en IPTV, Tesis Doctoral, Universidad del Cauca, 2017.
- [32] G.1022: Buffer models for media streams on TCP transport, (n.d.). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1022-201607-l/en> (accessed October 20, 2019).
- [33] LTE, (2019). <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> (accessed October 20, 2019).
- [34] R. Agusti, F. Alvarez, F. Palacios, R. Ferre, LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, Fundación Vodafone España, Barcelona, Spain, 2010. <https://docplayer.es/9085428-Lte-nuevas-tendencias-en-comunicaciones-moviles-autores.html> (accessed November 19, 2019).
- [35] M.A. Rahman, A. Pakštas, F.Z. Wang, Network modelling and simulation tools, *Simul. Model. Pract. Theory.* 17 (2009) 1011–1031. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.02.005>.
- [36] F.J. Suárez, P. Nuño, J.C. Granda, D.F. García, Computer networks performance modeling and simulation, in: *Model. Simul. Comput. Netw. Syst.*, Elsevier, 2015: pp. 187–223. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800887-4.00007-9>.
- [37] B. Kitchenham, R. Pretorius, D. Budgen, O. Pearl Brereton, M. Turner, M. Niazi, S. Linkman, Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study, *Inf. Softw. Technol.* 52 (2010) 792–805. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.03.006>.
- [38] J.C. de Almeida Biolchini, P.G. Mian, A.C.C. Natali, T.U. Conte, G.H. Travassos, Scientific Research Ontology to Support Systematic Review in Software Engineering, *Adv Eng Inf.* 21 (2007) 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.11.006>.
- [39] ITU-T Recommendation, P.910: Subjective video quality assessment methods for multimedia applications, (2008). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-l/en> (accessed April 12, 2018).
- [40] ITU-T Recommendation, P.911: Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications, (1998). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.911-199812-l/en> (accessed April 12, 2018).
- [41] ITU-T Recommendation, P.1201.1: Parametric non-intrusive assessment of audiovisual media streaming quality - Lower resolution application area, (2012). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1201.1> (accessed April 12, 2018).

- [42] ITU-T Recommendation, P.1202 : Parametric non-intrusive bitstream assessment of video media streaming quality, (2012). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1202> (accessed April 12, 2018).
- [43] D. Tsolkas, E. Liotou, N. Passas, L. Merakos, A survey on parametric QoE estimation for popular services, *J. Netw. Comput. Appl.* 77 (2017) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.016>.
- [44] M. García-Pineda, J. Segura-García, S. Felici-Castell, A holistic modeling for QoE estimation in live video streaming applications over LTE Advanced technologies with Full and Non Reference approaches, *Comput. Commun.* 117 (2018) 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.12.010>.
- [45] C.M. Lentisco, L. Bellido, J.C. Cuellar, E. Pastor, J.L. Arciniegas, QoE-Based Analysis of DASH Streaming Parameters Over Mobile Broadcast Networks, *IEEE Access.* 5 (2017) 20684–20694. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2755438>.
- [46] S. Malisuwan, D. Milindavanij, W. Kaewphanuekrungsi, Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) of the 4G LTE Perspective, *Int. J. Future Comput. Commun.* 5 (2016) 158–162.
- [47] Z. Yetgin, Z. Göçer, Quality of experience prediction model for progressive downloading over mobile broadcast networks, *Telecommun. Syst.* 58 (2015) 55–66. <https://doi.org/10.1007/s11235-014-9873-8>.
- [48] F. Wamser, D. Staehle, J. Prokopec, A. Maeder, P. Tran-Gia, Utilizing buffered YouTube playtime for QoE-oriented scheduling in OFDMA networks, in: 2012 24th Int. Teletraffic Congr. ITC 24, 2012: pp. 1–8.
- [49] A. El Essaili, D. Schroeder, E. Steinbach, D. Staehle, M. Shehada, QoE-Based Traffic and Resource Management for Adaptive HTTP Video Delivery in LTE, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 25 (2015) 988–1001. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2014.2367355>.
- [50] A.E. Essaili, D. Schroeder, D. Staehle, M. Shehada, W. Kellerer, E. Steinbach, Quality-of-experience driven adaptive HTTP media delivery, in: 2013 IEEE Int. Conf. Commun. ICC, 2013: pp. 2480–2485. <https://doi.org/10.1109/ICC.2013.6654905>.
- [51] A.D. Masi, K. Wac, Predicting Quality of Experience of Popular Mobile Applications from a Living Lab Study, in: 2019 Elev. Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2019: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2019.8743306>.
- [52] D. Ghadiyaram, J. Pan, A.C. Bovik, A Subjective and Objective Study of Stalling Events in Mobile Streaming Videos, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 29 (2019) 183–197. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2017.2768542>.
- [53] M. Torres Vega, D.C. Mocanu, S. Stavrou, A. Liotta, Predictive no-reference assessment of video quality, *Signal Process. Image Commun.* 52 (2017) 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.image.2016.12.001>.
- [54] R. Huang, X. Wei, Y. Gao, C. Lv, J. Mao, Q. Bao, Data-driven QoE prediction for IPTV service, *Comput. Commun.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.11.013>.
- [55] P. Casas, A. D’Alconzo, F. Wamser, M. Seufert, B. Gardlo, A. Schwind, P. Tran-Gia, R. Schatz, Predicting QoE in cellular networks using machine learning and

- in-smartphone measurements, in: 2017 Ninth Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2017: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965687>.
- [56] J. Segura-Garcia, S. Felici-Castell, M. Garcia-Pineda, Performance evaluation of different techniques to estimate subjective quality in live video streaming applications over LTE-Advance mobile networks, *J. Netw. Comput. Appl.* 107 (2018) 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.01.006>.
- [57] A. Socola, M. Solera, L.-R. Jiménez, M. Toril, Evaluación Subjetiva de la Calidad de Vídeo para el Servicio YouTube Live en un Dispositivo Móvil, *Rev. Ibérica Sist. E Tecnol. Informação.* 17 (2019) 552–562.
- [58] A. Raake, M.N. Garcia, W. Robitza, P. List, S. Göring, B. Feiten, A bitstream-based, scalable video-quality model for HTTP adaptive streaming: ITU-T P.1203.1, in: 2017 Ninth Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2017: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965631>.
- [59] W. Robitza, M.N. Garcia, A. Raake, A modular HTTP adaptive streaming QoE model; Candidate for ITU-T P.1203., in: 2017 Ninth Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2017: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965689>.
- [60] W. Robitza, S. Göring, A. Raake, D. Lindegren, G. Heikkilä, J. Gustafsson, P. List, B. Feiten, U. Wüstenhagen, K. Yamagishi, M.-N. Garcia, S. Broom, HTTP Adaptive Streaming QoE Estimation with ITU-T Rec. P. 1203: Open Databases and Software, in: *Proc. 9th ACM Multimed. Syst. Conf.*, ACM, New York, NY, USA, 2018: pp. 466–471. <https://doi.org/10.1145/3204949.3208124>.
- [61] S. Satti, C. Schmidmer, M. Obermann, R. Bitto, L. Agarwal, M. Keyhl, P.1203 evaluation of real OTT video services, in: 2017 Ninth Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX, 2017: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965682>.
- [62] Amarisoft, (2018). <https://www.amarisoft.com/> (accessed June 20, 2018).
- [63] D. Tse, P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- [64] L. Guo, Y. Meng, What is wrong and right with MSE?, in: 2006: pp. 212–215.
- [65] J. De Vriendt, D. De Vleeschauwer, D.C. Robinson, QoE Model for Video Delivered Over an LTE Network Using HTTP Adaptive Streaming, *Bell Labs Tech. J.* 18 (2014) 45–62. <https://doi.org/10.1002/bltj.21645>.
- [66] ISO/IEC 23009-1:2014(E). *Information technology — Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH)*, (2014).
- [67] T. Stockhammer, *Dynamic adaptive streaming over HTTP --: standards and design principles*, in: ACM, Munich, Germany, 2011: pp. 133–144. <https://doi.org/10.1145/1943552.1943572>.
- [68] Release 8, (2008). <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8> (accessed January 20, 2019).
- [69] Release 9, (2010). <http://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9> (accessed January 20, 2019).
- [70] Release 12, (2014). <http://www.3gpp.org/specifications/releases/68-release-12> (accessed January 20, 2019).
- [71] Release 13, (2014). <http://www.3gpp.org/release-13> (accessed January 20, 2019).
- [72] Release 15, (2018). <https://www.3gpp.org/release-15> (accessed October 3, 2019).
- [73] Release 16, (2019). <https://www.3gpp.org/release-16> (accessed October 3, 2019).

- [74] Release 17, (2019). <https://www.3gpp.org/release-17> (accessed October 3, 2019).
- [75] V. Mata G., *Análisis y Comparativa de los Protocolos de Transmisión de vídeo Adaptativo por Internet*, Tesis, Carlos III de Madrid, 2014.
- [76] ALBEDO Telecom, (2019). <http://www.albedotelecom.com/> (accessed June 5, 2019).
- [77] E. Intriago A., *Análisis de Tecnologías de Streaming: Evaluación de Protocolos y Diseño de un Caso de Estudio*, Trabajo fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [78] M. Taha, J. Lloret, A. Canovas, L. Garcia, Survey of Transportation of Adaptive Multimedia Streaming service in Internet, *Netw. Protoc. Algorithms*. 9 (2017) 85–125. <https://doi.org/10.5296/npa.v9i1-2.12412>.
- [79] M. Taha, A Novel CDN Testbed for Fast Deploying HTTP Adaptive Video Streaming, in: *ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering)*, 2016: pp. 65–71. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3021385.3021399> (accessed June 7, 2018).
- [80] M. Taha, J. Lloret, A. Ali, L. Garcia, Adaptive video streaming testbed design for performance study and assessment of QoE, *Int. J. Commun. Syst.* 31 (2018). <https://doi.org/10.1002/dac.3551>.
- [81] S. Tanwir, H. Perros, Modeling live adaptive streaming over HTTP, *Comput. Commun.* 85 (2016) 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.025>.
- [82] W.Y. Campo, H.-F. Bermudez, E. Astaiza, Characterization of traffic of the video streaming service based on lexical analyzers, *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* 26 (2018) 448–458.
- [83] W.Y. Campo-Muñoz, G. Chanchí-Golondrino, M. Camacho-Ojeda, Uso de técnicas de emulación en la construcción de un modelo de tráfico para un servicio multimedia, *Ing. Investig. Tecnol.* XVIII (2017) 209–221.
- [84] E.V. Berrío, R.C.H. Reyes, Asignación Equitativa De Capacidad Para Tráfico Unicast-Multicast En Redes IPTV Con Almacenamiento Distribuido De Contenidos, *Rev. En Telecomunicaciones E Informática*. 1 (2011). <https://revistas.upb.edu.co/index.php/telecomunicaciones/article/view/1248> (accessed August 24, 2015).
- [85] B. Villanueva Ocampo, D. López Sarmiento, E. Rivas Trujillo, Métodos de modelamiento y predicción de tráfico orientados a plataformas de transmisión de video e IPTV usando series de tiempo, *Rev. Científica*. (2012) 10–21. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/4019/6026> (accessed April 18, 2016).
- [86] GNURadio, GNU Radio wiki - gnuradio.org, (2018). <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki> (accessed October 20, 2018).
- [87] F. Bellard, LTE Base Station Software, Fabr. Bellards Website. (2018). <http://bellard.org/lte/> (accessed October 20, 2018).
- [88] H. Chaari, K. Mnif, L. Kamoun, Video Quality Transmission Evaluation over Next Generation Wireless Networks, in: *2015 IEEE 29th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Workshop*, 2015: pp. 338–343. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2015.61>.

- [89] Q. Zheng, H. Du, J. Li, W. Zhang, Q. Li, Open-LTE: An Open LTE simulator for mobile video streaming, in: Chengdu, China, 2014: pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/ICMEW.2014.6890630>.
- [90] I. Gomez, P. Sutton, A. Nag, A. Selim, L. Doyle, V. Ramachandran, A. Kokaram, A software radio LTE network testbed for video quality of experience experimentation, in: Erfurt, Germany, 2017: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/QoMEX.2017.7965667>.
- [91] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, J. Nin-Guerrero, An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3, in: ACM, Miami, Florida, USA, 2011: pp. 293–298. <https://doi.org/10.1145/2068897.2068948>.
- [92] M. Solera, M. Toril, I. Palomo, G. Gomez, J. Poncela, A Testbed for Evaluating Video Streaming Services in LTE, *Wirel. Pers. Commun.* (2017) 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4999-0>.
- [93] M.A. Mohamed, H.F. Ibrahim, Performance evaluation for video streaming data over LTE-A networks, in: 2017 12th Int. Conf. Comput. Eng. Syst. ICCES, 2017: pp. 701–707. <https://doi.org/10.1109/ICCES.2017.8275396>.
- [94] L.R. Jimenez, M. Solera, M. Toril, A Network-Layer QoE Model for YouTube Live in Wireless Networks, *IEEE Access.* 7 (2019) 70237–70252. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918433>.
- [95] D. Ciabrone, S. Tennina, D. Tsolkas, L. Pomante, A QoE Performance Evaluation Framework for LTE Networks, in: 2018 IEEE 19th Int. Symp. World Wirel. Mob. Multimed. Netw. WoWMoM, 2018: pp. 14–19. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2018.8449757>.
- [96] S. Park, M. Agiwal, H. Kwon, H. Jin, An Evaluation Methodology for Spectrum Usage in LTE-A Networks: Traffic Volume and Resource Utilization Perspective, *IEEE Access.* 7 (2019) 67863–67873. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918646>.
- [97] LENA, (2019). <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/> (accessed June 27, 2018).
- [98] H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J.L. Arciniegas, W.Y. Campo, M.- Cano, Performance validation of NS3-LTE emulation for live video streaming under QoS parameters, in: 2017 IEEE 13th Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun. WiMob, 2017: pp. 300–307. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115836>.
- [99] H.-F. Bermudez, R. Sanchez-Iborra, J.L. Arciniegas, W.Y. Campo, M.-D. Cano, Statistical validation of an LTE emulation tool using live video streaming over reliable transport protocols, *Telecommun. Syst.* 71 (2019) 491–504. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0521-6>.
- [100] Wowza, (2018). <https://www.wowza.com/products/streaming-engine> (accessed February 8, 2018).
- [101] Wireshark, (2018). <https://www.wireshark.org/> (accessed March 5, 2018).
- [102] Dash JavaScript Player, (2017). <http://players.akamai.com/dash/> (accessed September 1, 2018).
- [103] The Apache HTTP Server Project, (n.d.). http://httpd.apache.org/ABOUT_APACHE.html (accessed April 4, 2018).
- [104] R&S CMW500 Wideband Radio Communication Tester, CMW_GSM_UserManual_V3-2-10., (n.d.).

- [105] P.1057 : Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling, (n.d.). <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1057> (accessed July 14, 2017).
- [106] R. Sanchez-Iborra, M.-D. Cano, J. Garcia-Haro, Performance evaluation of QoE in VoIP traffic under fading channels, in: *Comput. Inf. Technol. WCCIT 2013 World Congr. On*, 2013: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WCCIT.2013.6618721>.
- [107] S. Aksu, E.E. Güngör, G. Karabulut Kurt, Effect of Nakagami-m fading on the QoE performance of VoIP in wireless mesh networks, in: *2011 IEEE Int. Symp. World Wirel. Mob. Multimed. Netw.*, 2011: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2011.5986174>.
- [108] Y.R. Zheng, Chengshan Xiao, Simulation models with correct statistical properties for rayleigh fading channels, *IEEE Trans. Commun.* 51 (2003) 920–928. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.813259>.
- [109] J. Schiller, R.A. Srinivasan, M.R. Spiegel, *Schaum's outline of probability and statistics*, 4th ed., McGraw-Hill Education, 2013.
- [110] Big Buck Bunny » Download, (2018). <https://peach.blender.org/download/> (accessed September 9, 2019).
- [111] H. Rani, E. khushboo Bansal, A Review on HTTP Streaming Strategies in Media Streaming, *Int. J. Eng. Comput. Sci.* 4 (2015). <http://ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/3352> (accessed June 5, 2018).
- [112] E.H.-K. Wu, M.-Z. Chen, JTCP: Jitter-Based TCP for Heterogeneous Wireless Networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 22 (2004) 757–766. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.825999>.
- [113] International Standard ISO/IEC 13818-1, *Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*, (2000).
- [114] Y.-K. Wang, R. Even, T. Kristensen, R. Jesup, RFC 6184: RTP Payload Format for H.264 Video, (2011). <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6184> (accessed March 18, 2019).
- [115] P.J. Leach, T. Berners-Lee, J.C. Mogul, L. Masinter, R.T. Fielding, J. Gettys, *Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1*, (n.d.). <https://tools.ietf.org/html/rfc2616#section-14.17> (accessed March 18, 2019).
- [116] H.264 : Advanced video coding for generic audiovisual services. Serie H: Audio Audiovisual And Multimedia Systems; Infrastructure of audiovisual services – Coding of moving video, (n.d.). <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.264-201003-S> (accessed March 18, 2018).
- [117] Open Distribution Fitter app - MATLAB dfitool - MathWorks, (n.d.). <https://es.mathworks.com/help/stats/dfitool.html> (accessed June 18, 2018).
- [118] R: The R Project for Statistical Computing, (n.d.). <https://www.r-project.org/> (accessed June 18, 2018).
- [119] D. Freedman, P. Diaconis, On the histogram as a density estimator:L2 theory, *Z Wahrscheinlichkeitstheorie Verwandte Geb.* 57 (1981) 453–476. <https://doi.org/10.1007/BF01025868>.
- [120] E. Astaiza H., H.-F. Bermudez, P. Muñoz, *Simulación de sistemas de telecomunicaciones*, 1st ed., Armenia, Quindio, 2007.
- [121] A.M.L. Porras, *Diseño estadístico de experimentos, análisis de la varianza y temas relacionados: tratamiento informático mediante SPSS*, 2000.

- <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=114861> (accessed March 19, 2019).
- [122] ITU-R Recommendation, BT.513: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures, (2012). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I/en> (accessed April 12, 2018).
- [123] ITU-T Recommendation, P.913 : Methods for the subjective assessment of video quality, audio quality and audiovisual quality of Internet video and distribution quality television in any environment, (2016). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.913> (accessed April 15, 2018).
- [124] ITU-T Recommendation, P.1203.2 : Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport - Audio quality estimation module, (2017). <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1203.2-201710-I/en> (accessed February 2, 2018).
- [125] ITU-T Recommendation, P.1203.3 : Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport - Quality integration module, (2017). <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.1203.3-201710-I> (accessed March 2, 2019).
- [126] D. Ghadiyaram, J. Pan, A.C. Bovik, A Subjective and Objective Study of Stalling Events in Mobile Streaming Videos, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 29 (2019) 183–197. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2017.2768542>.
- [127] D. Ghadiyaram, J. Pan, A.C. Bovik, Learning a Continuous-Time Streaming Video QoE Model, *IEEE Trans. Image Process.* 27 (2018) 2257–2271. <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2790347>.
- [128] Open Broadcaster Software | OBS, (2019). <https://obsproject.com/es> (accessed May 20, 2019).
- [129] J.M. Moreno-Roldán, M.A. Luque-Nieto, V. Díaz-del-Río, P. Otero, J. Poncela, Parametric quality assessment in underwater video, in: 2015 2nd Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev. INDIACom, 2015: pp. 1270–1274.
- [130] ITU-T Recommendation, Y.1541 : Objetivos de calidad de funcionamiento de red para servicios basados en el protocolo Internet, (2011). <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I/es> (accessed November 8, 2019).
- [131] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Academic Press, 2011. https://books.google.com/books/about/4G_LTE_LTE_Advanced_for_Mobile_Broadband.html?id=DLbsq9GD0zMC (accessed September 24, 2019).
- [132] V.M. Quintero-Flórez, C.M. Hernández-Bonilla, D. Giraldo-Medina, D.F. Uribe-Ante, Modelado y simulación de planificadores de recursos radio para una red LTE, *ENTRAMADO.* 12 (2016) 230–245. <https://doi.org/10.18041/entramado.2016v12n2.24229>.
- [133] D-ITG, Distributed Internet Traffic Generator. Universita' degli Studi di Napoli "Federico II" (Italy), (n.d.). <http://www.grid.unina.it/software/ITG/> (accessed September 25, 2019).
- [134] IPTraf - An IP Network Monitor, (n.d.). <http://iptraf.seul.org/> (accessed September 30, 2019).

- [135] M. Macià Roca, Desarrollo de una plataforma para la distribución de contenidos audiovisuales utilizando MPEG-DASH, Universidad Politécnica de Cataluña, 2016. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/83586> (accessed October 17, 2019).
- [136] ISO/IEC 14496-12, Information technology — Coding of audio-visual objects — Part 12: ISO base media file format, (2008).
- [137] ISO/IEC 13818-1, Information technology — Generic coding of moving pictures and associated audio information — Part 1: Systems, ISO. (2013).
- [138] Adobe Flash Video File Format Specification 10.1.2.01, (2010). http://download.macromedia.com/f4v/video_file_format_spec_v10_1.pdf (accessed May 17, 2019).
- [139] L. Pozueco Álvarez, Diseño y evaluación de sistemas de estimación de ancho de banda disponible para servicios adaptativos de vídeo streaming, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia - España, 2014.
- [140] The Evolved Packet Core, (2019). <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> (accessed October 21, 2019).
- [141] Á.G. Sánchez, M.O. Mier, Introducción a la simulación de sistemas discretos, (2006) 44. http://www.iol.etsii.upm.es/arch/intro_simulacion.pdf (accessed December 29, 2018).
- [142] R. Beuran, Introduction to Network Emulation, Edición: 1, Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2012.
- [143] LENA, (2019). <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/> (accessed October 20, 2018).
- [144] P. Markov, H. Mehrpour, Statistical modeling of MPEG coded video, in: Proc. Ninth IEEE Int. Conf. Netw. ICON 2001, 2001: pp. 38–43. <https://doi.org/10.1109/ICON.2001.962314>.
- [145] G.U. Yule, On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with Special Reference to Wolfer's Sunspot Numbers, Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character. 226 (1927) 267–298. <https://www.jstor.org/stable/91170> (accessed July 29, 2019).
- [146] T. Molloy, Z. Yuan, G.-M. Muntean, Real time emulation of an LTE network using NS-3, in: Limerick, Ireland, 2014: pp. 251–257. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0694>.
- [147] MPEG-DASH vs. Apple HLS vs. Microsoft Smooth Streaming vs. Adobe HDS, Bitmovin. (2015). <https://bitmovin.com/mpeg-dash-vs-apple-hls-vs-microsoft-smooth-streaming-vs-adobe-hds/> (accessed June 3, 2018).
- [148] Live Video Streaming Software | Wirecast, (n.d.). https://www.telestream.net/wirecast/overview.htm?&gclid=Cj0KCQjwoInnBRDDARIsANBVyAQalir31IkLWBCdGx7RzclpIpGliqVufV1JdWDY7vQf3wTeLjHFMHYaAl8mEALw_wcB (accessed May 20, 2018).
- [149] OBS, (n.d.). <https://obsproject.com/es> (accessed May 20, 2019).
- [150] R.& S. Rohde & Schwarz, R&S®CMW500 Production Test - Overview, (2017). https://www.rohde-schwarz.com/us/product/cmw500-productstartpage_63493-10341.html (accessed June 28, 2017).

- [151] Karl Pearson and the Chi-Squared Test on JSTOR, (n.d.). <https://www.jstor.org/stable/1402731> (accessed August 25, 2019).
- [152] Tablas de Estadística.pdf, (n.d.). <http://materias.unq.edu.ar/pye/Trabajos%20Pr%C3%A1cticos/Tablas%20de%20Estadística.pdf> (accessed August 23, 2019).
- [153] T.W. Anderson, On the Distribution of the Two-Sample Cramer-von Mises Criterion, *Ann. Math. Stat.* 33 (1962) 1148–1159. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704477>.
- [154] S. S. Shapiro, M. B. Wilk, An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples) on JSTOR, (n.d.). <https://www.jstor.org/stable/2333709> (accessed August 23, 2019).
- [155] S. Ishihara, Test for Color-Blindness, 24 Plates Edition, Kanehara Shuppan Co., Ltd, Tokyo, Japan, 1972.

Anexo A

A. Conceptos básicos y análisis sistemático

A continuación, se amplían los conceptos básicos utilizados en el desarrollo de la presente tesis doctoral, y que fueron presentados en los marco teóricos en la sección 2.1. Adicionalmente, se presenta un resumen de los resultados del análisis sistemático realizado para esta investigación y que sirve de soporte para el análisis del estado del arte presentado en el marco de antecedentes en la sección 2.2.

A.1 Streaming tradicional

Un protocolo de *Streaming* tradicional, es aquel en el cual, desde el instante en que el cliente establece la conexión con el servidor, se realiza un seguimiento de la misma (conoce el estado del cliente) hasta que se cierra dicha conexión. Los protocolos de *streaming* tradicional tienen como característica: *i*) el servidor envía paquetes al cliente a una tasa fija, es decir, el *bit-rate* es constante, y es aquel con el que se ha codificado el vídeo y el audio, y *ii*) el servidor sólo envía paquetes hasta que se llena el búfer del cliente. En este tipo de *streaming*, la tasa o *bit-rate* de codificación debe ser menor que el ancho de banda disponible del usuario para evitar cortes de forma frecuente en la reproducción. Un buen ejemplo del *streaming* tradicional es el protocolo RTSP (*Real-Time Streaming Protocol*) [75].

A.2 Streaming de descarga progresiva

El *streaming* de descarga progresiva se fundamenta en la descarga de ficheros de datos de un servidor HTTP. El vídeo se puede reproducir mientras la descarga está activa. Al detenerse la reproducción, la descarga continúa y se almacena en caché el contenido, el cual posteriormente se puede reproducir sin cortes. La desventaja de esta técnica radica en el hecho que si el cliente no desea ver el contenido se habrá gastado el ancho de banda de forma innecesaria al haber descargado todo el contenido [75].

A.3 Streaming adaptativo

Al igual que la anterior, esta técnica se basa en HTTP, pero su diferencia radica en el hecho que no se realiza una descarga del total del contenido o fichero, por el contrario, se realizan varias descargas progresivas del total del contenido. El contenido de vídeo y audio se divide en pequeños segmentos (*chunks*) y se codifica según el formato en el que se quiera transmitir. Cada segmento es independiente del anterior y del posterior, por lo que pueden ser codificados de forma independiente. De este modo, durante la reproducción del contenido, el cliente se encargará de adaptarse a las condiciones de red o a la disponibilidad de los recursos, solicitando los segmentos de una calidad u otra en función de su algoritmo de adaptación del bit-rate (ABR) [135].

El contenido de vídeo se transcodifica a distintas tasas (*bit-rates*), conocidos como perfiles (*profiles*) del contenido. Cada servicio puede tener hasta un total de 16 *profiles* que se diferencian en el *bit-rate*, la resolución o el tipo de codificación. Luego ese contenido de vídeo se divide en fragmentos, *chunks* o segmentos con una duración entre 2 y 10 segundos, dependiendo del protocolo de transmisión de vídeo a utilizar. En los servidores se encuentran los ficheros *manifest* dónde se indican las diferentes *profiles* disponibles para ser utilizados por el cliente.

En la Figura A.1 se presenta el diagrama de flujo en donde se aprecia el comportamiento del cliente y el servidor cuando utiliza un protocolo de *streaming* adaptativo. Inicialmente, el cliente se autentica e indica su identificador, características del dispositivo utilizado, ancho de banda disponible, y solicita el contenido de video que quiere ver al servidor más cercano, en caso de que este no lo tuviera en caché se

solicita al *Servidor Origin*. Para ambas situaciones y partiendo que la petición es correcta, el servidor envía al cliente el fichero XML (*eXtensible Markup Language*) conocido como el *manifest*. El cliente, al analizar los diferentes *profiles*, y teniendo en cuenta las condiciones de red y a su disponibilidad de los recursos elige la que más se ajuste. Responde al servidor con el *profile* requerido y éste envía el fichero en pequeños fragmentos para que el reproductor del cliente pueda reproducir el vídeo [75].

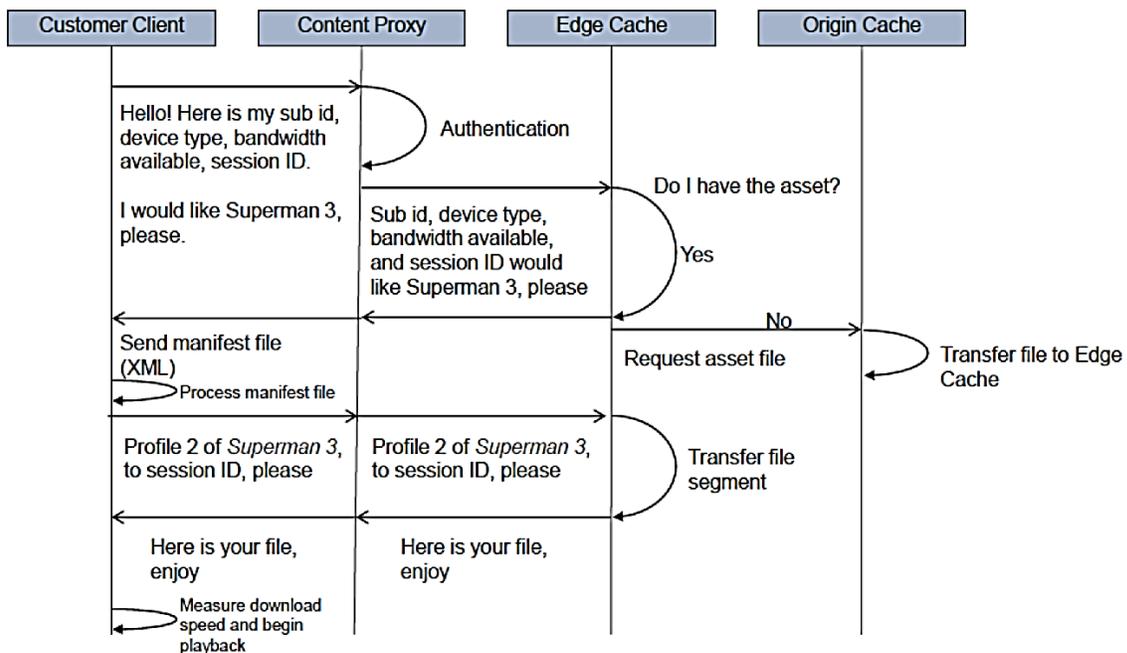


Figura A.1. Interacción cliente-servidor con *streaming* adaptativo [75]

Las técnicas más populares de *streaming* adaptativo sobre HTTP son: *HTTP Smooth Streaming* – HSS [5], *HTTP Live Streaming* – HLS [6], *HTTP Dynamic Streaming* – HDS [7] y *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* – DASH [8];

A.3.1 *HTTP Smooth Streaming* – HSS [5]

HSS es la solución de *Microsoft*, está basado en el formato del MPEG-4 (*Moving Picture Experts Group - MPEG*), en la especificación de ISO/IEC 14496-12 *ISO Base Media File Format* [136], el archivo *manifest* es tipo *.ismc*. Una vez recibido el *manifest* el cliente puede ver los *bit-rates* y resoluciones disponibles, así como una lista de los *chunks* disponibles (así como la duración de cada uno). El cliente elige una calidad y

solicita los fragmentos. Una de las características de HSS es que el *manifest* (también conocido como *Playlist*) sólo se pide una vez. Cada fragmento lleva en la cabecera información A.

A.3.2 HTTP Live Streaming – HLS [6]

HLS es la solución propuesta por *Apple*, el archivo *manifest* es tipo *.m3u8*. En el caso de HLS, el *Index file (Playlist)* se refresca de forma periódica. El servidor de HLS toma cada flujo de entrada y los codifica, normalmente el vídeo se codifica como H.264 y el audio como AAC (*Advanced Audio Encoding*), conformando un *MPEG-2 Transport Stream* [137]. Luego se divide en segmentos (archivos *.ts*) para distribuirlos por la red. Por último, el cliente se encarga de elegir la calidad del contenido a descargar [75].

A.3.3 HTTP Dynamic Streaming – HDS [7]

HDS es la solución de Adobe para la transmisión de vídeo por Internet. HDS define una unidad de contenido más pequeña que denomina fragmento. Un fragmento es una unidad descargable que contiene un intervalo de vídeo o audio, estos se identifican por un número y se pueden agrupar en segmentos. Los fragmentos de HDS utilizan un formato F4V [138] basado en el formato MPEG-4 de la especificación ISO/IEC 14496-12 [136]. El archivo *manifest* es tipo *.f4m*, el cual lleva la información de los segmentos y fragmentos.

A.3.4 Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – DASH [8]

DASH es un estándar desarrollado por *MPEG* que se convierte en un estándar internacional en noviembre de 2011 y publicado como ISO/IEC 23009-1:2012 en abril de 2012. Una segunda edición es publicada en mayo de 2014 como ISO/IEC 23009-1:2014. DASH fue diseñado para evitar las incompatibilidades presentados entre las otras técnicas de *streaming* adaptativo propietarias, para lo cual define conceptos como: periodos, segmentos representaciones y *sets*. El archivo *manifest* es tipo *.mpd*; el fichero MPD (*Media Presentation Description*), el cual se almacena en el servidor HTTP, describe las características de cada una de las representaciones de los contenidos y sus segmentos. En un *streaming* en vivo, el fichero MPD se actualizará cada cierto intervalo [139].

A.4 Métodos para estimar la QoE

A.4.1 Métodos subjetivos

Los métodos de estimación de la QoE subjetivos se realiza a través de encuestas que se aplican a un grupo de usuarios, generalmente en entornos controlados y siguiendo los lineamientos planteados por la ITU. La métrica utilizada es la MOS (*Mean Opinion Score*). La principal ventaja de usar este tipo de método es que se evalúa la QoE directamente con el usuario y se logran obtener sus atributos sociológicos y psicológicos. La gran desventaja radica en el tiempo y el costo que se debe invertir para realizar las encuestas. Este método utilizado para realizar comprobaciones con los otros métodos con el fin de definir qué tan precisos son.

A.4.2 Métodos Objetivos

En los métodos objetivos existen dos maneras de clasificar los diferentes algoritmos o formas de medir la calidad de experiencia asociada al video. Una de ellas se basa en la necesidad de utilizar una señal de referencia para realizar la medición y la otra depende del tipo de análisis que se le realice a la traza de video (paquetes o flujos de bits).

A.4.3 Métodos Indirectos

Estos métodos buscan establecer una relación del valor de los parámetros de calidad de servicio y el valor obtenido de calidad de la experiencia. La relación es expresada mediante un modelo matemático o un modelo de correlación.

A.5 Métricas de QoE

A continuación, se definen las métricas más usuales utilizadas en la estimación de la QoE.

– *Mean Opinion Score* – MOS

Es la media aritmética sobre todos los valores individuales en una escala predefinida que un sujeto asigna a su opinión sobre el rendimiento de la calidad de un sistema

[39]. La evaluación generalmente se obtiene en una prueba subjetiva, pero también se pueden estimar algorítmicamente. La MOS es indicador de QoE más importante.

– *Peak-Signal-to-Noise-Ratio* –PSNR

Calcula el valor cuadrático medio de la diferencia entre el vídeo original y los frames recibidos.

– *Pseudo-Subjective Quality Assessment* – PSQA

Cuantifica la calidad de una transmisión de video o audio (o multimedia) en el extremo receptor. Es una técnica específica de aprendizaje estadístico. La herramienta estadística utilizada para este fin es el modelo *Random Neural Network*.

– *Structural Similarity Index* – SSIM

Es una métrica perceptual que cuantifica la degradación de la calidad de imagen causada por el procesamiento, tal como la compresión o pérdidas en la transmisión de datos. Es una métrica de referencia completa (FR).

– *Moving Pictures Quality Metric* – MQPM

se basa en un modelo de visión básico. La entrada a la métrica es una secuencia de video original y una versión distorsionada. La distorsión se calcula primero como la diferencia entre las secuencias original y distorsionada.

A.6 Redes Long Term Evolution - LTE

La red de acceso LTE es simplemente una red de estaciones base, eNB (*evolved NodeB*), que genera una arquitectura plana. No hay un controlador inteligente centralizado, y los eNB normalmente están interconectados a través de la interfaz X2 y hacia la red central por la interfaz S1 (S1-U para el plano de usuario y S1-MME para el plano de control) ver Figura 2.2. La razón para distribuir la inteligencia entre las estaciones base en LTE es acelerar la configuración de la conexión y reducir el tiempo requerido para una transferencia.

Para brindar el soporte de conmutación de paquetes con perfecta movilidad y con capacidad de ofrecer todos los servicios de comunicaciones mediante conmutación de paquetes, se introduce una nueva arquitectura para el núcleo de Red. Se logra un diseño eficiente del Core mediante la separación de los planos de usuario y de control. El *Mobility Management Entity* (MME) maneja el plano de control, mientras que el *Serving Gateway* (S-GW) maneja el plano de usuario. El sistema completo de la arquitectura de LTE es denominado *Evolved Packet System* (EPS). El EPS está conformado por la nueva red de acceso E-UTRAN y por el EPC. Ver Figura 2.2.

La nueva solución de acceso de LTE para lograr una alta eficiencia espectral de radio y permitir una programación eficiente tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, se basa en OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para el enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) para el enlace ascendente; además en combinación con una modulación de orden superior (hasta 64 QAM), grandes anchos de banda (hasta 20 MHz) y multiplexación espacial en el enlace descendente (hasta 4x4), permiten alcanzar altas velocidades de datos. La velocidad de datos máxima teórica más alta en el canal de transporte es de 75 Mbps en el enlace ascendente, y en el enlace descendente, usando multiplexación espacial, la velocidad puede ser tan alta como 300 Mbps [33]. Para LTE *Advanced* - LTE-A con la agregación de portadoras, extensión MIMO y mejoras de acceso del enlace ascendente, se pueden alcanzar velocidades pico hasta 500 Mbps en el enlace ascendente y 1 Gbps en enlace descendente.

Para posibilitar el despliegue mundial, soportando tantos requisitos regulatorios como sea posible, LTE está desarrollado para varias bandas de frecuencia, bandas operativas E-UTRA, que actualmente van desde 700 MHz hasta 2.7GHz, y 3.5GHz como complemento de LTE al despliegue 5G. Los anchos de banda disponibles también son flexibles a partir de 1,4 MHz hasta 20 MHz. LTE está desarrollado para admitir tanto la tecnología dúplex por división de tiempo (TDD) como el dúplex por división de frecuencia (FDD). En R8 hay 15 bandas especificadas para FDD y ocho bandas para TDD. En R9 se agregaron cuatro bandas para FDD [33].

A continuación, se describe a nivel funcional bloques constitutivos del núcleo de red [140]:

- *Policy Control and Charging Rules Function* - PCRF: el PCRF proporciona la gestión del servicio y el control de los servicios LTE. Es responsable de la toma de decisiones de control de políticas además de regular las funcionalidades de cobro basadas en el flujo en el *Control Enforcement Function* - PCEF. Ayuda a tener un control dinámico sobre QoS a su vez ayuda a los operadores, para proporcionar a los clientes una variedad de QoS y opciones de carga al optar por un servicio.

- *Home Subscriber Server* - HSS: HSS es la base de datos maestra, contiene los datos de suscripción del usuario para admitir el control de llamadas y las entidades de administración de sesiones. Esto incluye el perfil de QoS suscrito y las restricciones de acceso cuando el suscriptor está en *roaming*. Proporciona la autenticación y autorización de suscriptores. Contiene la información relacionada con la ubicación del suscriptor y la información sobre la red de datos de paquetes (*Packet Data Network* - PDN) a la que está conectado el suscriptor. HSS también soporta redes de múltiple acceso y múltiple dominio, que proporciona manejo de tráfico de extremo a extremo para los suscriptores que se mueven entre LTE y la red inalámbrica de área local (WLAN).

- *PDN Gateway* - P-GW: P-GW es responsable de asignar dinámicamente direcciones IP a los suscriptores y enruta los paquetes del plano de usuario. Proporciona la aplicación de QoS y cómo se basa la carga según las políticas en el PCRF. El PCRF brinda las instrucciones sobre cómo tratar con un servicio de datos en particular, teniendo en cuenta los términos de prioridad de QoS según el perfil del suscriptor. Actúa como un ancla para la movilidad entre las tecnologías 3GPP y no 3GPP.

- *Serving Gateway* - S-GW: S-GW dirige los paquetes de datos a todos los suscriptores, que actúa como un ancla de movilidad local para el portador de datos que se mueve entre las entregas de eNB. También actúa como el ancla entre las tecnologías LTE y 3GPP. Obtiene la información sobre el portador cuando el UE está en un estado inactivo. S-GW termina la ruta de datos de enlace descendente y también activa la búsqueda cuando llegan datos de DL para el UE.

- *Mobility Management Entity* - MME: MME es el nodo de control clave para la red de acceso LTE que procesa la señalización entre el UE y la red Core. Es responsable de elegir el SWG para un UE en el proceso de registro inicial y también para el traspaso intra-LTE, incluida la reubicación del nodo en el core de red (CN). Las funciones principales que lleva a cabo el MME están relacionadas con la gestión del portador y la gestión de la conexión. La gestión del portador incluye el mantenimiento, el establecimiento y la liberación de los portadores. Y la gestión de la conexión incluye el establecimiento de la conexión, así como la seguridad entre la red y el UE.

A.7 Enfoques del Modelado de tráfico

La Figura A.2 presenta los diferentes enfoques dados por [35], [36] para realizar un estudio de modelado de tráfico.

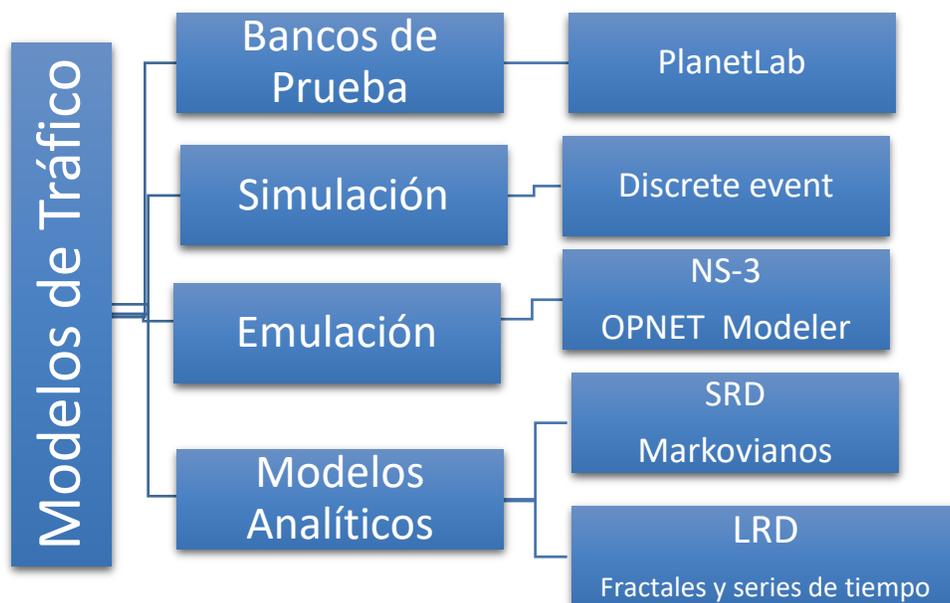


Figura A.2. Enfoques de modelos de tráfico

A.7.1 Bancos de prueba

Son una representación a escala del entorno real del servicio, que permite capturar con precisión las transacciones detalladas de la red, la desventaja de este enfoque son los costos en infraestructura. PlanetLab⁴ es un ejemplo de una colección de máquinas distribuidas a través de Internet como un laboratorio, para que los investigadores desarrollen nuevos servicios.

A.7.2 Simulación

Específicamente de eventos discretos – DES, utiliza eventos para describir fenómenos en un determinado momento, donde cada evento tiene un instante de incidencia puntual, pueden ser representados sobre la escala temporal discreta de la simulación ocupando una única posición. Tienen la característica de ser organizados cronológicamente, lo cual facilita el procesado. Cada evento es una acción y su resultado es la modificación de variables de estado, lo cual los hace idóneos para simular con lenguaje de Programación Orientado a Objetos [141].

A.7.3 Ambientes de emulación

Se presentan como una alternativa a usar antes de una implementación real para servicios de internet a gran escala [142]. Es un híbrido entre los enfoques de bancos de prueba y simulación que busca mejorar las desventajas de uno con las ventajas del otro, actualmente tiene un gran alto grado de aceptación [16]. Los simuladores de redes NS-3 y OPNET Modeler son herramientas que brindan la posibilidad de realizar emulación y actualmente son de gran interés dentro de la comunidad de investigación, adicionalmente NS-3 es una herramienta de código abierto que cuenta con el soporte y desarrollo por parte de la comunidad académica, LENA para LTE es un ejemplo [143].

⁴ <http://www.planet-lab.org/>

A.7.4 Modelos matemáticos o analíticos

Estos buscan formas de modelar el tráfico generado en redes de telecomunicaciones mediante el uso de herramientas matemáticas, con el fin de identificar estadísticamente las características que describen su comportamiento. Inicialmente, las primeras redes modeladas fueron las telefónicas, para las cuales se usan modelos como el de *Erlang*, el cual utiliza distribuciones poissonianas; pero este tipo de modelos, aunque bastante precisos sobre redes telefónicas, no son adecuados para describir el tráfico actual de las redes de datos IP y mucho menos el tráfico de los complejos sistemas de IPTV y *streaming* de vídeo. Dentro de este contexto, actualmente se han desarrollado diferentes tipos de modelos para describir de forma precisa el tráfico sobre redes de datos, basándose en el hecho de que este tipo de tráfico presenta un alto índice de autocorrelación, dependiendo, en cierta medida, de sus valores pasados. Entre estos se encuentran los modelos de dependencia de corto alcance - *Short Range Dependence* (SRD), como los clásicos markovianos [144], y los de dependencia de largo alcance - *Long Range Dependence* (LRD), dentro de los cuales encontramos los fractales y los basados en series de tiempo [145].

A.8 Análisis Sistemático

Para el desarrollo del análisis sistemático enfocado a la temática tratada en esta tesis doctoral, se desarrollan una serie de fases similares a las de cualquier investigación empírica, las cuales son definidas en [37]:

- Planeación de la revisión.
- Ejecución de la revisión.
- Reporte de la revisión.

A.8.1 Planeación de la revisión

Para la ejecución de esta fase se desarrolla las siguientes actividades:

- **Formulación de la pregunta.**

El contexto de la revisión sistemática de la presente investigación doctoral se enfoca en el modelado de tráfico generado por el servicio de video en redes móviles LTE con parámetros de QoE.

a. Definición de la pregunta de investigación.

Para la presente propuesta doctoral se han planteado las siguientes preguntas de investigación, que se resolverán con la revisión sistemática:

- ¿Cuáles son los estudios de modelos de tráfico para diferentes servicios en redes de telecomunicaciones?
- ¿Existen modelos de tráfico para el servicio de video en redes de telecomunicaciones?
- ¿Cuáles son los estudios de modelos de tráfico para el servicio de video en vivo en redes LTE?
- ¿Cómo se define la calidad de la experiencia en redes inalámbricas?
- ¿Qué metodologías existen para evaluar la calidad de la experiencia QoE?
- ¿Qué metodologías existen para evaluar la calidad de la experiencia QoE del servicio de vídeo en redes inalámbricas?
- ¿Qué metodologías existen para evaluar la calidad de la experiencia QoE de servicios de vídeo en vivo en redes LTE?
- ¿Cuáles son los parámetros de QoE que influyen en el servicio de Video en vivo?
- ¿Cuáles son las técnicas que existen para el streaming de video en redes de telecomunicaciones?
- ¿Qué técnicas de streaming son utilizadas en redes móviles LTE?
- ¿Qué implicaciones adicionales se deben de tener en cuenta para asegurar la QoE para un servicio de video en vivo en una red LTE?
- ¿Cómo se define QoE en redes LTE?

De las preguntas planteadas, se puede concluir que se encuentran agrupadas en tres grupos temáticos de búsqueda: modelado de tráfico, metodologías para la evaluación de la QoE y técnicas de Streaming de video.

b. Palabras Claves

Se definen las siguientes palabras claves: Modelos de tráfico, Video en Vivo, redes inalámbricas, redes LTE, streaming de Video, calidad de la experiencia.

c. Población.

Corresponde al grupo de población que será observada por en la intervención de la Revisión Sistemática.

d. Diseño Experimental

Se enfoca hacia el meta- análisis que será conducido con la información recogida de la Revisión Sistemática, es decir, a lo que se enfocará el análisis de los datos recogidos. Ejemplo: Publicaciones por año, porcentaje de estudios encontrados por país, etc.

- **Elección de Recursos**

El objetivo de éste ítem es seleccionar las fuentes en donde buscar los estudios primarios.

a. Definir cadena de Búsqueda.

Se definen las cadenas de búsqueda, de acuerdo al grupo temático identificado, lo que permitirán dar solución a las preguntas de investigación planteadas inicialmente y que se resolverán con la revisión sistemática. A continuación, se muestran algunas de las cadenas de búsqueda definidas:

- (TITLE-ABS-KEY (traffic AND models) AND (wireless AND networks) AND (lte) AND (live AND video)) AND ORIG-LOAD-DATE AFT 1506297600 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI"))
- (TITLE-ABS-KEY (video) AND (on AND live) AND (telecommunication) AND ((qos) OR (qoe) OR (traffic)) AND (lte)) AND ORIG-LOAD-DATE AFT 1506556800 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP"))
- TITLE-ABS-KEY(Video) AND (STREAMING) AND (TELECOMMUNICATION) AND ((QoS) OR (QoE) OR (traffic)) AND (LTE)
- TITLE-ABS-KEY(QoE Methodologies)

b. Lista de Recursos

La revisión sistemática se ejecutará en las siguientes bases de datos: ScienceDirect, IEEE Xplorer, ACM.

c. Selección de Estudios

A partir de los recursos definidos, se describe el proceso y criterio para la selección de estudios primarios, los cuales se basan en los siguientes parámetros:

- Criterios de inclusión- exclusión por título.
- Criterios de inclusión- exclusión en función de las palabras clave.
- Criterios de inclusión- exclusión en función del resumen.
- Criterios de inclusión- exclusión en función de las conclusiones del estudio.

A.8.2 Ejecución de la revisión

Esta fase de la revisión sistemática se desarrollan las siguientes etapas:

1. Ejecución de la selección.

En esta sección se lleva a cabo el proceso de selección de estudios iniciales o primarios, se analizan los estudios obtenidos y los resultados de su evaluación, se realizaron las siguientes actividades:

a. Selección de estudios iniciales.

Se ejecutan las búsquedas planeadas y se seleccionan los estudios que coincidan con los tipos de estudios predefinidos para la búsqueda durante el criterio de inclusión y el criterio de exclusión.

b. Evaluación de la calidad de los estudios.

Se debe evaluar la calidad del estudio, el rigor, credibilidad y la relevancia de los estudios primarios.

c. Extracción de todos los datos primarios.

Después de realizar la evaluación de cada uno de los estudios primarios, de los estudios seleccionados se extraer los datos que son relevantes de cada uno de ellos.

2. Análisis de los resultados.

Esta actividad permite analizar los hallazgos encontrados en los diferentes estudios mediante lo definido en el diseño experimental de la fase de Planificación.

A.8.3 Reporte de la Revisión

A continuación, se presentan de forma gráfica los resultados previos obtenidos con las cadenas de búsqueda y que responden a cada una de las preguntas de investigación de la revisión sistemática.

a. Estudios de tráfico para diferentes servicios en redes de telecomunicaciones

En la revisión, para los trabajos aprobados para el año 2020 y 2011, se encuentra 16496 trabajos en donde se relacionan estudios de tráfico, de los cuales se tienen que el 75% (12310) son en redes inalámbricas, 19% (3167) en redes ópticas y 6%(992) en redes cableadas. Los datos anteriores se muestran en la Figura A.3.

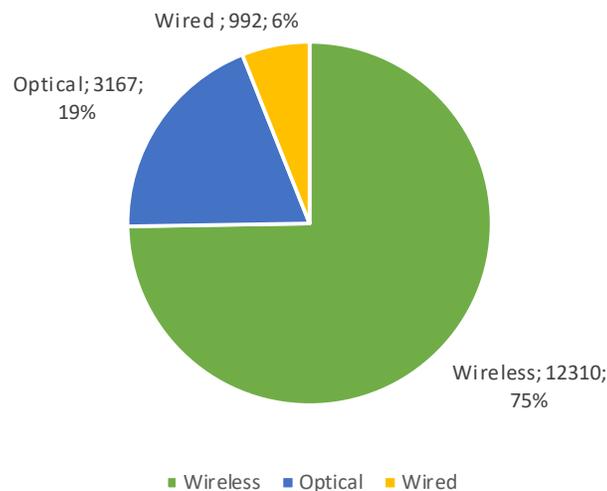


Figura A.3. Estudios de tráfico en diferentes redes de telecomunicaciones

b. Estudios de tráfico para el servicio de video en vivo sobre redes inalámbricas.

Para este ítem, se encuentra en la búsqueda un total de 139 trabajos, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: 17 estudios en redes WiFi, 12 estudios en redes WiMax, 70 estudios en redes celulares de 3° Generación y 40 estudios en redes LTE. Los datos se muestran en la Figura A.4

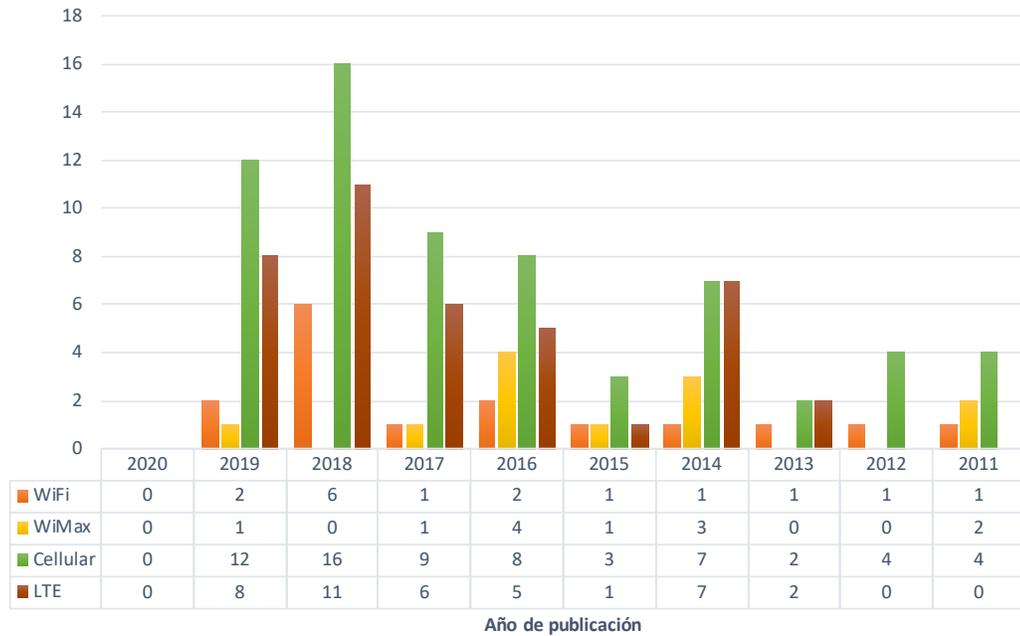


Figura A.4. Estudios de tráfico del servicio de video en vivo en redes inalámbricas

En la sección 2.2 se presenta el análisis de los estudios que mayor relevancia presenta para el desarrollo de la presente investigación.

- c. Estudios del servicio de video en vivo que relacionan parámetros de QoS o QoE en redes LTE.

Se encuentran 66 documentos, la Figura A.5 muestra su distribución en una línea de tiempo. De acuerdo a la relevancia encontrada en su análisis, se presenta en la sección 2.2

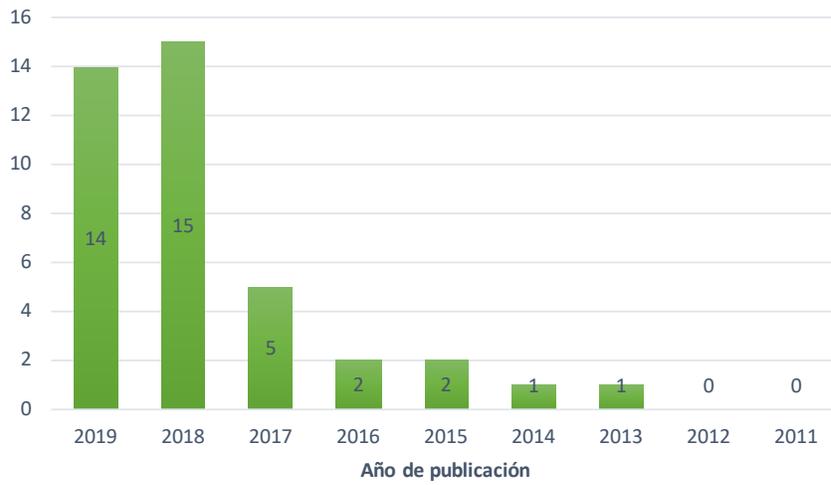


Figura A.5. Estudio de trafico para servicios de video en redes LTE

d. Estudios de streaming de video que relacionan parámetros de QoS-QoE en redes LTE

Se encuentran 174 documentos, la Figura A.6 muestra su distribución en una línea de tiempo. De acuerdo a la relevancia encontrada en su análisis, se presenta en la sección 2.2

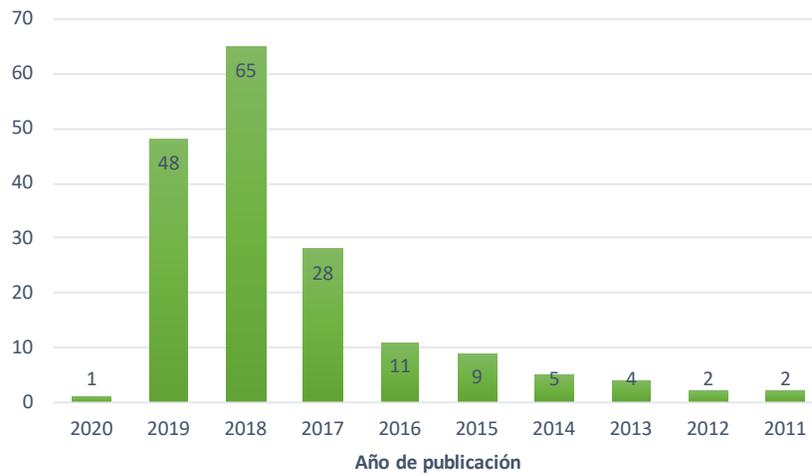


Figura A.6. Estudios de streaming de video y QoS-QoE en redes LTE

e. Estudios de metodología para la estimación de la QoE

Se encuentran 121 documentos, la Figura A.7 muestra su distribución en una línea de tiempo. De acuerdo a la relevancia encontrada en su análisis, se presenta en la sección 2.2

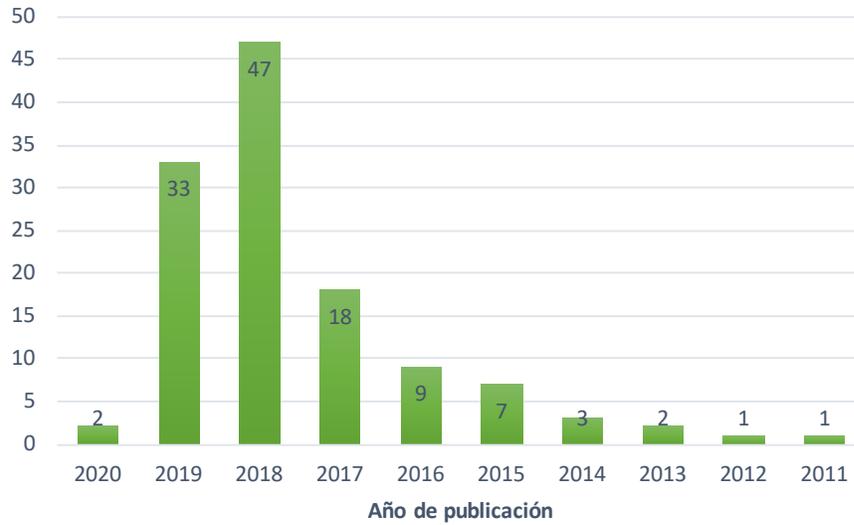


Figura A.7. metodología para la estimación de la QoE

Anexo B

B. Configuración de Escenarios de Experimentación

A continuación, se presentan los desarrollos realizados en la implementación de los escenarios de experimentación de emulación y real. En las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 3.6 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los esquemas generales.

B.1 Escenario de Emulación

El escenario de emulación está conformado por un servidor real de video, una red LTE (simulada con NS3) y un cliente (User Equipment, UE). A continuación, se describe la configuración de cada uno de los elementos constitutivos de este escenario.

B.1.1 Red LTE simulada con NS3

En la implementación del sistema LTE, se utiliza la herramienta LENA del *Network Simulator* NS-3, el cual es un programa de código abierto. Este simulador cuenta con un estado del arte creciente debido alto grado de utilización en investigación en el área de las telecomunicaciones. El funcionamiento de NS3 requiere de ciertas librerías y funciones que deben ser instaladas a priori. Para facilitar el proceso, se recomienda crear un archivo *shell* (ejecutable con instrucciones para la terminal) con los programas

necesarios y guardarlo en la carpeta *Home* con la extensión *.sh*, el archivo *shell* debe quedar así:

```

~\requisitos-ns3.sh
apt-get install -y gcc g++ python
apt-get install -y gcc g++ python python-dev
apt-get install -y qt4-dev-tools
apt-get install -y mercurial
apt-get install -y bzip2
apt-get install -y cmake libc6-dev libc6-dev-i386 g++-multilib
apt-get install -y gdb valgrind
apt-get install -y gsl-bin libgsl0-dev libgsl0ldbl
apt-get install -y flex bison libfl-dev
apt-get install -y tcpdump
apt-get install -y sqlite sqlite3 libsqlite3-dev
apt-get install -y libxml2 libxml2-dev
apt-get install -y libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev
apt-get install -y vtun lxc
apt-get install -y uncrustify
apt-get install -y doxygen graphviz imagemagick
apt-get install -y texlive texlive-extra-utils texlive-latex-extra
apt-get install -y python-sphinx dia
apt-get install -y python-pygraphviz python-kiwi python-pygoocanvas
apt-get install -y libgoocanvas-dev
apt-get install -y libboost-signals-dev libboost-filesystem-dev
apt-get install -y openmpi-bin openmpi-common openmpi-doc
apt-get install -y libopenmpi-dev
apt-get install -y cvs
apt-get install -y git
apt-get install -y cmake autoconf p7zip-full
apt-get install -y unrar

```

Figura B.1. Archivo ejecutable shell

De esta forma, y luego de otorgar todos los permisos de ejecución para utilizar todos los comandos, quedan instaladas todas las dependencias necesarias para NS3. La instalación de NS3 puede hacerse por varios métodos; el más directo requiere entrar a la página de descargas de NS3 (<https://www.nsnam.org>) y descargar la última versión disponible. A continuación, se obtiene un archivo comprimido de nombre *ns-allinone* (todo en uno) y se descomprime por facilidad en la carpeta *Home*, con lo cual solo hace falta compilar el proyecto desde la carpeta de NS3.

El siguiente *script* corresponde al programa de emulación principal utilizado para la implementación del servicio de LTE a través de la herramienta LENA con NS-3.

```

/* -*- Mode: C++; c-file-style: "gnu"; indent-tabs-mode:nil; -*- */
/*
 * Copyright (c) 2011 Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)
 *
 */

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/lte-module.h"

```

```

#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/global-router-interface.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include <ns3/buildings-helper.h>
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include "ns3/tap-bridge-module.h"
#include <ns3/buildings-module.h>
#include "ns3/csma-helper.h"

/*****
CONFIGURACION DE RED
*      47dBm
|
/ \
/ \ P2P P2P
eNodeB-----| EPC |-----[]PC-remoto
3 antenas      -----
7.0.0.1        1.0.0.2
1.0.0.1
*
CSMA |
[]-----[] 26dBm
Nodo   UE   7.0.0.2
200.100.0.2 200.100.0.1
*****/

using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("lte7");
int
main (int argc, char *argv[])
{
    GlobalValue::Bind ("ChecksumEnabled", BooleanValue (true));
    NS_LOG_INFO ("");
    // Valores por defecto
    bool rem = false;
    bool useBuildings = false;
    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("rem", "Genera un archivo RadioEnvironmentMap [bool]", rem);
    cmd.AddValue ("useBuildings", "crea edificios para simular un entorno urbano", rem);

    LogComponentEnable ("lte7", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("UdpEchoClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("UdpEchoServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("Ipv4L3Protocol", LOG_LEVEL_INFO);

    cmd.Parse (argc, argv);
    ConfigStore inputConfig;
    inputConfig.ConfigureDefaults ();
    cmd.Parse (argc, argv);

    /*****/
    NS_LOG_INFO ("\tCreando los nodos E-UTRAN");
    // Crear nodos: eNodeB y UE
    NodeContainer enbNodes;
    NodeContainer ueNodes;
    enbNodes.Create (3);
    ueNodes.Create (1);

    // Modelos de movilidad: posicion constante
    MobilityHelper mobility;
    mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
    mobility.Install (enbNodes);
    mobility.Install (ueNodes);
    // Posicion de los nodos UE

```

```

Ptr< MobilityModel > mob = ueNodes.Get (0) -> GetObject< MobilityModel > ();
mob -> SetPosition (Vector (20.0, 45.0, 1.5));

/*****/
NS_LOG_INFO ("\tInstalando el sistema EPC de tipo PointToPoint");
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<EmuEpcHelper> epcHelper = CreateObject<EmuEpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
epcHelper->Initialize ();

/*****/
NS_LOG_INFO ("\tCreando el sistema de antena");
Ptr<LteHexGridEnbTopologyHelper> lteHexGridEnbTopologyHelper =
CreateObject<LteHexGridEnbTopologyHelper> ();
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetLteHelper (lteHelper);

lteHelper->SetEnbAntennaModelType ("ns3::ParabolicAntennaModel");
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("Beamwidth", DoubleValue (90));
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("MaxAttenuation", DoubleValue (20.0));

if (useBuildings){
    lteHelper->SetPathlossModelAttribute ("ShadowSigmaExtWalls", DoubleValue (0));
    lteHelper->SetPathlossModelAttribute ("ShadowSigmaOutdoor", DoubleValue (1));
    lteHelper->SetPathlossModelAttribute ("ShadowSigmaIndoor", DoubleValue (1.5));
}
else {
    lteHelper->SetAttribute ("PathlossModel", StringValue
("ns3::FriisPropagationLossModel"));
}

// Dispositivos de red
NetDeviceContainer enbDevs = lteHexGridEnbTopologyHelper-
>SetPositionAndInstallEnbDevice (enbNodes);
NetDeviceContainer ueDevs = lteHelper -> InstallUeDevice (ueNodes);

/*****/
NS_LOG_INFO ("\tAgregando el dispositivo remoto");
// Creacion del enlace PointToPoint
PointToPointHelper p2ph;
//csma.SetChannelAttribute ("DataRate", StringValue ("100Gbps"));
//csma.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)));

//Nodos conectados: PGW y PC-Remoto
NodeContainer PcRemoto;
PcRemoto.Create (1);

Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();
Ptr<Node> p2pNode = PcRemoto.Get (0);

NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, p2pNode);

CdmaHelper csma;
PcRemoto.Create (1);
Ptr<Node> csmaNode = PcRemoto.Get (1);

NetDeviceContainer ExtDevices = csma.Install (NodeContainer (p2pNode, csmaNode));

/*****/
NS_LOG_INFO ("\tAgregando el nodo al UE");
PcRemoto.Create (1);
Ptr<Node> ueNode = ueNodes.Get (0);
Ptr<Node> csmaUe = PcRemoto.Get (2);
// Se emplea el mismo tipo de enlace PointToPoint

```

```

NetDeviceContainer ueExtDevices = csma.Install (NodeContainer (ueNode, csmaUe));

/*****/
NS_LOG_INFO ("\tAgregando los protocolos IP y activando el Bearer");
// Instalacion de la pila de protocolos en los dispositivos ip
InternetStackHelper internet;
internet.Install (PcRemoto);
internet.Install (ueNodes);

// Asignar direcciones ip a los dispositivos remotos
Ipv4AddressHelper ipv4h;

ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer remoteIpIface = ipv4h.Assign (internetDevices);

ipv4h.SetBase ("200.100.0.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer remoteExtIface = ipv4h.Assign (ueExtDevices);

ipv4h.SetBase ("200.100.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer ExtIface = ipv4h.Assign (ExtDevices);

Ipv4InterfaceContainer ueIpIface = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer
(ueDevs));

// Enrutamiento

Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;

Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting
(csmaNode -> GetObject<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), Ipv4Address ("200.100.1.1"), 1);
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("1.0.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), Ipv4Address ("200.100.1.1"), 1);
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("200.100.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), Ipv4Address ("200.100.1.1"), 1);

remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (p2pNode -> GetObject
<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), 1);

remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (pgw -> GetObject <Ipv4>
());
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("200.100.1.0"), Ipv4Mask
("255.255.255.0"), Ipv4Address ("1.0.0.2"), 5);
remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode -> GetObject
<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("200.100.1.0"), Ipv4Mask
("255.255.255.0"), Ipv4Address ("7.0.0.1"), 2);

remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (csmaUe -> GetObject<Ipv4>
());
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), 1);
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("1.0.0.0"), Ipv4Mask
("255.0.0.0"), Ipv4Address ("200.100.0.1"), 1);
remoteHostStaticRouting -> AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("200.100.1.0"), Ipv4Mask
("255.255.255.0"), Ipv4Address ("200.100.0.1"), 1);

// Activar los bearers
enum EpsBearer::Qci q = EpsBearer::GBR_CONV_VIDEO;
EpsBearer bearer (q);
lteHelper->ActivateDedicatedEpsBearer (ueDevs, bearer, EpcTft::Default ());

// enlace entre el eNodeB y los UE
lteHelper->AttachToClosestEnb (ueDevs, enbDevs);

```

```

/*****/
if (useBuildings){
    // Instalacion de protocolos LTE
    NS_LOG_INFO ("\tCreando edificios");
    BuildingsHelper::Install (ueNodes);
    BuildingsHelper::Install (enbNodes);

    double x_min = 305.0;
    double x_max = 340.0;
    double y_min = 5.0;
    double y_max = 30.0;
    double z_min = 0.0;
    double z_max = 30.0;
    Ptr<Building> b = CreateObject <Building> ();
    b->SetBoundaries (Box (x_min, x_max, y_min, y_max, z_min, z_max));
    b->SetBuildingType (Building::Residential);
    b->SetExtWallsType (Building::ConcreteWithWindows);
    b->SetNFloors (3);
    b->SetNRoomsX (3);
    b->SetNRoomsY (2);

    BuildingsHelper::MakeMobilityModelConsistent ();
}

/*****/
if (rem){
NS_LOG_INFO ("\tIniciando mapeado REM");
Ptr<RadioEnvironmentMapHelper> remHelper = CreateObject<RadioEnvironmentMapHelper> ();
    remHelper->SetAttribute ("ChannelPath", StringValue ("/ChannelList/0"));
    remHelper->SetAttribute ("OutputFile", StringValue ("rem.out"));
    remHelper->SetAttribute ("XMin", DoubleValue (0.0));
    remHelper->SetAttribute ("XMax", DoubleValue (150.0));
    remHelper->SetAttribute ("XRes", UIntegerValue (200));
    remHelper->SetAttribute ("YMin", DoubleValue (0.0));
    remHelper->SetAttribute ("YMax", DoubleValue (100.0));
    remHelper->SetAttribute ("YRes", UIntegerValue (200));
    remHelper->SetAttribute ("Z", DoubleValue (1.5));
    remHelper->SetAttribute ("UseDataChannel", BooleanValue (false));
    remHelper->SetAttribute ("Bandwidth", UIntegerValue (100));
    remHelper->SetAttribute ("Earfcn", UIntegerValue (2050));
    remHelper->Install ();
}
else {
    NS_LOG_INFO ("\tInstalando dispositivos TAP");

    TapBridgeHelper tapBridge;
    tapBridge.SetAttribute ("Mode", StringValue ("UseBridge"));
    tapBridge.SetAttribute ("DeviceName", StringValue ("tap1"));
    tapBridge.Install (csmaNode, ExtDevices.Get (1));

    tapBridge.SetAttribute ("DeviceName", StringValue ("tap0"));
    tapBridge.Install (csmaUe, ueExtDevices.Get (1));
}

NS_LOG_INFO ("");
Simulator::Stop (Seconds (180.0)); // tiempo de simulación
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
return 0;
}

```

B.1.2 Modificaciones a la librería LENA de NS3

El simulador NS3, como se encuentra configurado en la sección B.1.1, no acepta que un dispositivo (servidor-PC2) introduzca tráfico real sobre el sistema LTE, ni mucho menos que este tráfico se direcciona para su monitoreo más allá del UE simulado, en este caso el PC3, ver Figura 3.1. Por lo tanto, en este trabajo doctoral, a partir de las propuestas presentadas en [146] y que se centran en el direccionamiento del PC3 y en la clasificación del tipo de tráfico, se realizan las respectivas modificaciones que permitan esa funcionalidad del NS3.

Para lo anterior, fue necesario realizar dos modificaciones de código a la librería LENA de NS3. De forma resumida, para el direccionamiento, la tabla de enrutamiento de LENA en NS-3 conoce la ruta hasta el nodo UE (ver Figura B.2). Sin embargo, no se enruta más allá de este punto, por lo que es necesario asignar un número IMSI (International Mobile Subscriber Identity) al cliente (PC3) y asegurarse que la información que sea enviada al UE pueda alcanzar PC3 para que se pueda reproducir el video, monitorizar la información recibida y evaluar las prestaciones. Esta modificación se realiza en el archivo `ipv4-list-routing.cc` dentro de NS-3. La Figura B.3 muestra la ubicación donde se inician los cambios propuestos.

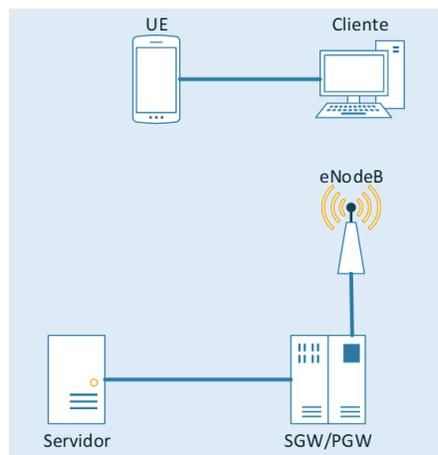


Figura B.2. Representación gráfica del escenario básico de emulación

```

126 // Patterned after Linux ip_route_input
127 bool
128 Ipv4ListRouting::RouteInput (Ptr<const
129                               UnicastFor
130                               LocalDeliv
131
132 {
133     NS_LOG_FUNCTION (this << p << header);
134     bool retVal = false;
135     bool forwardCheck;
136     NS_LOG_LOGIC ("RouteInput logic for r
137
138     NS_ASSERT (m_ipv4 != 0);
139     // Check if input device supports IP
140     NS_ASSERT (m_ipv4->GetInterfaceForDevice (idev) >= 0);
141     uint32_t iif = m_ipv4->GetInterfaceForDevice (idev);
142
143     forwardCheck = m_ipv4->IsDestinationAddress (header.GetDestination (), iif);
144     if ((header.GetSource ().IsEqual (Ipv4Address ("200.100.1.2")) &&
145         (header.GetDestination ().IsEqual (Ipv4Address ("200.100.0.100")) &&
146         (forwardCheck == false)))
147     {
148         Ipv4Header fHeader = header;
149         fHeader.SetDestination (Ipv4Address ("7.0.0.2"));
150         Ptr<Ipv4Route> route = Create<Ipv4Route> ();
151         route->SetDestination (fHeader.GetDestination ());
152         route->SetSource (fHeader.GetSource ());
153         route->SetGateway (fHeader.GetDestination ());
154         route->SetOutputDevice (m_ipv4->GetNetDevice (1));
155         ucb (route, p, fHeader);
156         return true;
157     }
158

```

Esta función enruta los paquetes que recibe cada nodo de NS-3 a nivel de la capa de red. Esta es la función que se modifica y se agregan cuatro condiciones

Figura B.3. Modificaciones al archivo ipv4-list-routing.cc

En el código se evalúan 4 condiciones para determinar el destino y la ubicación del paquete.

- Se revisa que el origen del paquete sea la dirección específica 200.100.1.2 que corresponde al servidor.
- Se revisa que el destino del paquete sea la dirección específica 200.100.0.100 que es la dirección del cliente.
- Al llegar al destino, UE, y si las condiciones concuerdan, la cabecera del paquete se cambia por la dirección del destino del UE (7.0.0.2).
- Se evalúa si el paquete fue recibido por el UE, en caso que llegue al UE debe de modificarse su dirección, ya que el destino real es el cliente (PC3).

Los cambios restantes, se orientan a realizar el proceso en sentido contrario, donde el cliente es el origen y el servidor el destino. Este proceso representa una edición a NS-3 muy específica, por lo tanto, se recomienda ser muy cuidadoso en su utilización, ya que puede alterar el funcionamiento de otras simulaciones. Por lo anterior, y para evitar modificar los archivos originales de NS-3, se crea el módulo *Iteemu.cc*, el cual es un módulo copiado de LTE, en donde se realizan las modificaciones sin riesgo.

En cuanto al tipo de tráfico, el problema radica en que NS3 no soporta tráfico de paquetes reales. La modificación consiste en que el tráfico de video *streaming* no sea descartado y se le permita continuar dentro de la red. Esta validación se realiza en el

archivo *epc-sgw-pgw-application.cc*. A continuación, se describe de una manera resumida los cambios realizados.

El *epc-sgw-pgw-application.cc* es el programa que se encarga de la funcionalidad del sistema SGW/PGW. El objetivo de modificar este archivo radica en el hecho que NS-3 no soporta tráfico de paquetes reales. Por lo tanto, al llegar el paquete al SGW/PGW se verifica el tipo de dato para controlar la prioridad y el *bearer* a utilizar. En esta parte se limita el tráfico de paquetes solo a los tipos UDP y TCP. Al reconocer el paquete como videostreaming, es descartado por NS-3. Las modificaciones al archivo fuente, permiten darle un tratamiento a este tipo de datos y que pueda continuar en la red. La Figura B.4 muestra la ubicación donde se inician los cambios propuestos.

```

138 bool
139 MyEpcSgwPgwApplication::RecvFromTunDevice (Ptr<Packet> packet, const Address& source, const Address& dest, ui
140
141     NS_LOG_FUNCTION (this << source << dest << packet << packet->GetSize ());
142
143     // get IP address of UE
144     Ptr<Packet> pCopy = packet->Copy ();
145     Ipv4Header ipv4Header;
146     pCopy->RemoveHeader (ipv4Header);
147     Ipv4Address ueAddr = ipv4Header.GetDestination ();
148     NS_LOG_LOGIC ("packet addressed to UE " << ueAddr);
149
150     // find corresponding UeInfo address
151     std::map<Ipv4Address, Ptr<UeInfo> >::iterator it = m_ueInfoByAddrMap.find (ueAddr);
152     if (it == m_ueInfoByAddrMap.end ())
153     {
154         //*****
155         std::map<Ipv4Address, Ptr<UeInfo> >::iterator ite = m_ueInfoByAddrMap.find (Ipv4Address("7.0.0.2"));
156         Ipv4Address enbAddr1 = ite->second->GetEnbAddr ();
157         uint32_t teid1 = ite->second->Classify (packet);
158         if (teid1 == 0)
159         {
160             NS_LOG_WARN ("no matching bearer for this packet Uq: " << ueAddr);
161         }
162         else
163         {
164             SendToS1uSocket (packet, enbAddr1, teid1);
165             //*****
166         }
167     }
168     else

```

Figura B.4. Modificaciones al archivo *epc-sgw-pgw-application.cc*

En la Figura B.4, se aprecia en la línea 139, el prefijo de *My* en el módulo *EpcSgwPgwApplication*, lo cual indica que este nuevo módulo alterno fue construido para evitar modificar los archivos originales del NS-3 y evitar el mal funcionamiento del mismo en otras simulaciones, igual procedimiento se realizó para al módulo *LTEemu*. La función que se modifica de este módulo es *RecvFromTunDevice*, este es el método que se asigna cuando un paquete de internet (IPv4) es recibido por el SGW/PGW y envía el paquete al UE. En la línea 152, de la Figura B.4, si esa condición es válida es porque el paquete es un paquete real (no simulado), por eso es necesario modificar esta condición. Para lo cual en la línea 155 se toma la información de un dispositivo

UE específico, el 7.0.0.2; la salida del tráfico real se hará exclusivamente a través de este dispositivo. Luego se clasifica el paquete y en caso que coincida con un *bearer* establecido, se envía a la antena en la que está asignado el UE por lo que sigue la ruta establecida correctamente, líneas 156-164. De esta forma el paquete que es inyectado de un dispositivo real al sistema LTE es aceptado. Las rutas en las cuales se ubican estas modificaciones son: ns3.26/src/lteemu*/model para el *ipv4-list-routing.cc* y ns3.26/src/internet/model para el *epc-sgw-pgw-application.cc*

B.1.3 Configuración del Wowza

El servidor de video en vivo – Live Video Streaming LVS utilizado en el desarrollo de la presente investigación es implementado a partir del servidor “*Wowza Streaming Engine* [100]”, el cual es una herramienta licenciada en la UPCT, lugar en donde se realizó la pasantía de investigación. 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 el DASH, RTSP, RTMP, Apple HLS, Adobe HDS y MS Smooth.

Inicialmente para su instalación, se debe descargar el instalador para el sistema operativo, para este caso Windows 64bits, en la url: <https://www.wowza.com/pricing/installer>, y completar la instalación con el serial correspondiente.

Para ingresar al servidor desde el navegador, se digita el “localhost:8088/enginemanager”, donde se debe iniciar sesión con el usuario creado previamente en la instalación. La Figura B.5 muestra la página inicial del servidor wowza.

Wowza Streaming Engine MANAGER Home Server Applications hector Help Sign Out

Welcome to Wowza Streaming Engine!

Subscription License

Status

Connections Incoming and outgoing

Usage CPU, Memory, Heap and Disk

Wowza CPU
Wowza Heap
Total Memory
Total Disk

0% 20% 40% 60% 80% 100%

06:30 am 07:00 am

Server Uptime
Since 02 May 2019 07:12:14 PM

Features
Transcoder: **Enabled** [see applications](#)
DRM: **Licensed**
nDVR: **Licensed**

Application Connection Settings
Use the following settings to publish a stream to the Wowza Streaming Engine server:

Host - Server	200.100.1.3
Host - Port	1935
Application	<i>A live application name on this server</i>
Stream Name	<i>The stream name you want to use</i>
Login	<i>A valid source user name and password</i>

Getting Started With Applications
Wowza Streaming Engine software uses **applications** to deliver streaming content. An application is a set of settings for live or video on demand (VOD) streaming. Either use the preinstalled default applications or go to the [Add Application](#) page to easily create and configure new applications. [Windows](#).

[Live Applications](#)

Figura B.5. Página inicial del servidor Wowza

Para configurar el servicio de video se debe ingresar al menú de *Application*, en donde se crear y parametriza el servicio en vivo correspondiente.

- **Creación de la Aplicación del servicio en vivo**

La aplicación de servicio de video en vivo, soporta las diferentes técnicas de streaming de descarga progresiva y adaptativa. Las cuales utilizan los protocolos RTMP, RTSP/RTP, DASH, HLS, HDS y HSS. Para su configuración, después de ingresar por la pestaña “*Application*”, se hace clic en “*Add aplicattion*” y en “*Live single server*”, como se observa en la Figura B.6

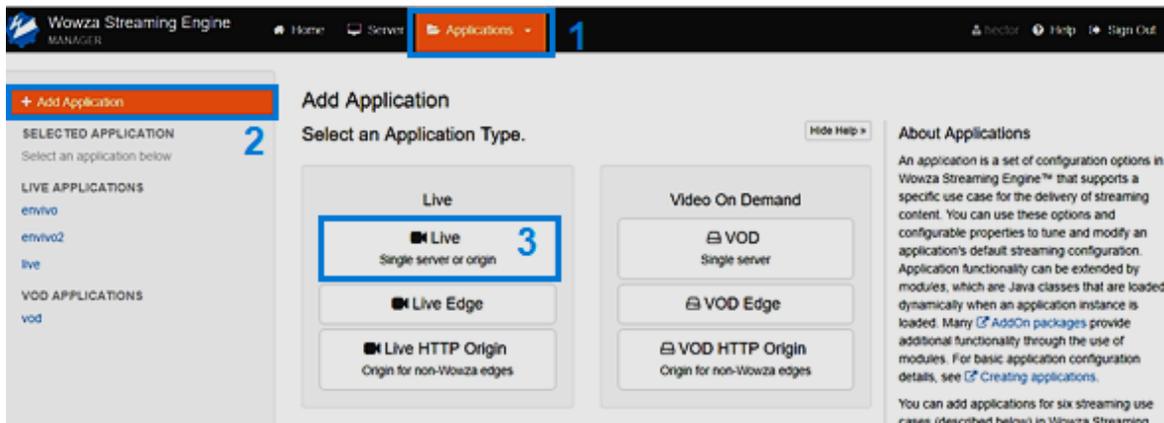


Figura B.6. Configuración de la aplicación del servicio en vivo

Al hacer clic en el recuadro tres de la Figura B.6, aparecerá una ventana preguntando por el nombre de la aplicación, para este caso la aplicación se denomina “envivo” y se da clic en “Add”.

A continuación, se configura el “*Playback Types*”, el cual determina los protocolos que se usan para realizar la transmisión de video sobre la red, se habilitan las técnicas de *streaming* que se deseen utilizar (ver Figura B.7), dentro de la pestaña “*Edit*”, en opciones se deja habilitado “*Cross-origin resource sharing*” para streams sobre HTTP y en “*Content Directory*” se deja la ruta por defecto.

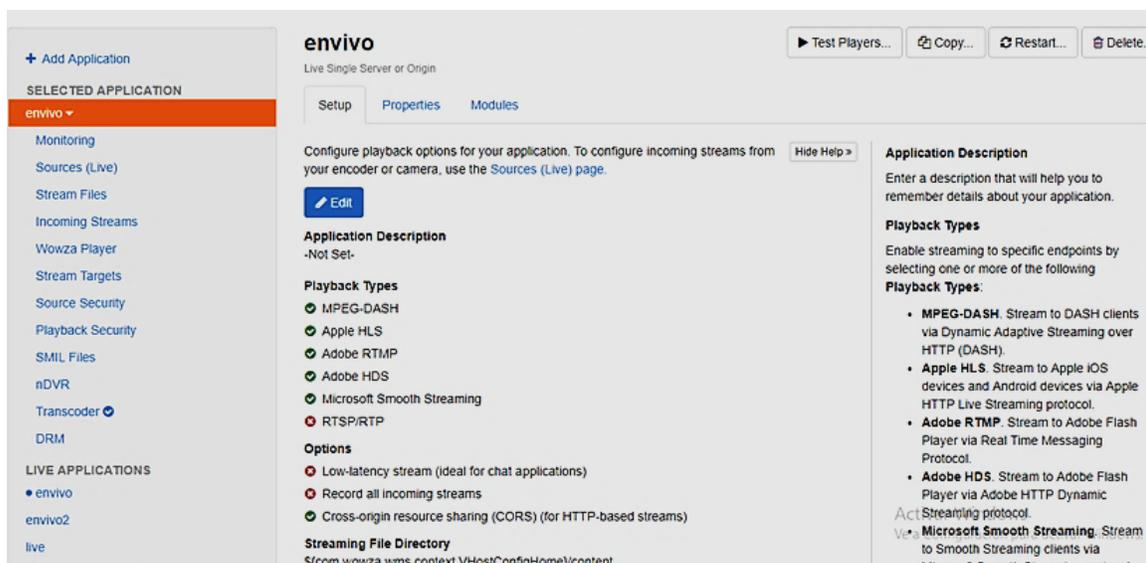


Figura B.7. Configuración Servicio en vivo

Se deja habilitada la opción “*Embedded 3GPP / MPEG-4 Timed Text tracks*” en la sección “*Closed Caption Sources*”, lo cual habilita las funcionalidades de subtítulos en caso de estar disponibles y por último se da clic en “*Save*”.

Para terminar con el proceso se reinicia el servidor y se verifica que se haya creado la aplicación “envivo”.

- ***Configuración de Archivos Smill para soporte de Streaming Adaptativo***

El Servidor de video Wowza Streaming Engine permite transmisiones en vivo a diferentes velocidades de bit a través de HTTP. Para lo cual se requiere que múltiples archivos de transmisión estén pre-codificados a las tasas de bits deseadas. Para que las reproducciones del vídeo cambien correctamente, los fotogramas clave de cada uno de los archivos deben estar alineados. Esto se realiza en el momento de la codificación, lo cual se logra configurando el intervalo de fotogramas clave y los valores de velocidad de fotogramas para que sean iguales para cada archivo codificado. A partir de los archivos codificados, se crea un archivo de Lenguaje de integración multimedia sincronizada (SMIL) que vincule los archivos para su reproducción. El archivo SMIL contiene los nombres y las descripciones de los flujos de velocidad de bits variables utilizados en la transmisión de velocidad de bits adaptativa. La Figura B.8 presenta la configuración de diferentes velocidades y resoluciones, en la cual se utilizan diferentes velocidades de bit para dar soporte a diferentes resoluciones. En el presente trabajo se utiliza las siguientes: 528 Kbps para 240p, 878 Kbps para 360p, 1128 Kbps para 480p, 2628 Kbps para 720p y 4628 Kbps para 1080p.

The screenshot shows the Wowza Streaming Engine Manager interface for configuring SMIL files. The main content area displays a table of streams in the SMIL file:

Source (src)	Language	Type	Actions
myStream_240p	eng	video	[Edit] [Delete]
myStream_360p	eng	video	[Edit] [Delete]
myStream_source	eng	video	[Edit] [Delete]
myStream_720p	eng	video	[Edit] [Delete]
myStream_1080p	eng	video	[Edit] [Delete]

The right-hand panel provides instructions on configuring SMIL files, including details on Title Attributes and Stream Tags.

Figura B.8. Configuración de streaming adaptativo.

Otro aspecto importante en la configuración del Wowza que posibilita la generación de *streaming* adaptativo con la técnica DASH, es la segmentación de los datos (normalmente denominada “*Chunks*”). Esta segmentación define cada cuanto tiempo se puede cambiar de calidad de video, lo cual depende de las condiciones del cliente: entorno, tipo de contenido, y cantidad de usuarios que demanden el servicio. Cuando los segmentos poseen una longitud de tiempo menor, se adaptan mucho mejor a los cambios del ancho de banda, no obstante, si estos poseen una longitud mucho mayor, se tiene una mayor eficiencia y calidad a la hora de codificar el contenido. Este parámetro se puede modificar en DASH, para lo cual se modifica la paquetización por medio de *Chunks* con 6 segundos de intervalo. Este valor se toma como referencia al comparar DASH con las otras técnicas de *streaming* adaptativo (HLS, HDS y HSS), las cuales recomiendan valores de paquetización de 4 a 6 segundos [147].

B.1.4 Configuración *Contenido multimedia a transmitir*

Para el proceso de producción y transmisión en vivo, se utilizaron las herramientas Wirecast® (versión de prueba) [148] u *Open Broadcaster Software* – OBS [149] de libre uso. Con el uso de estas herramientas de producción, se envía la señal en vivo hacia el servidor de video streaming. En el proceso de producción, se selecciona la

señal a transmitir en vivo y se configuran todos los parámetros de salida. En la Figura B.9 se aprecia la ventana principal del wirecast.

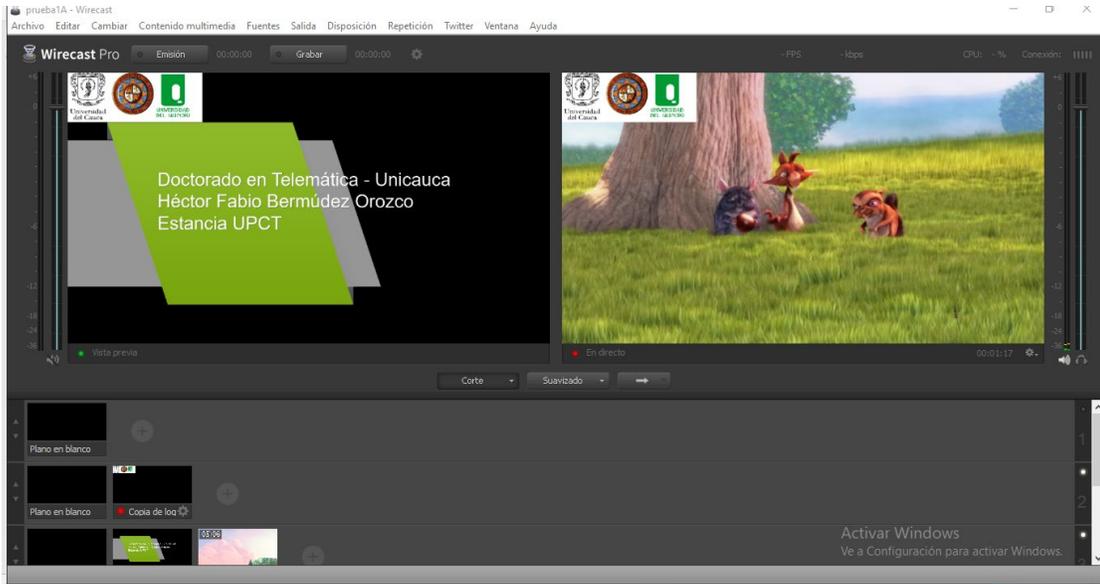


Figura B.9. Ventana principal del wirecast

Para configurar los parámetros de salida, se ingresan el destino, el cual para este caso es el motor de transmisión de Wowza, el tipo de codificación de audio y video y el número de *frames* por segundo. En la Figura B.10 se observa algunos parámetros de configuración, en este caso los pre-ajustes de codificación de audio y video.

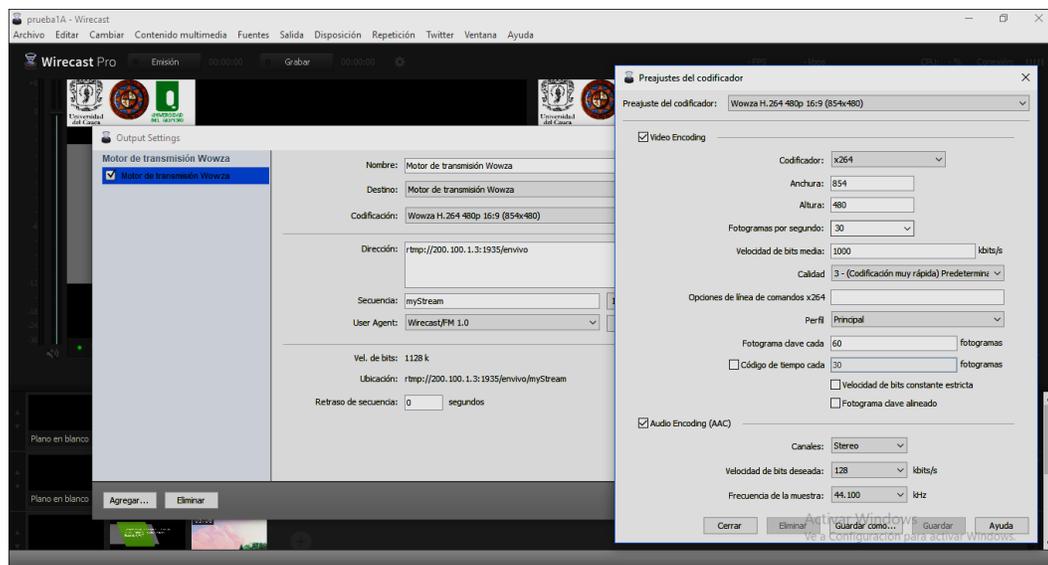


Figura B.10. Configuración de salida del wirecast

B.1.5 Configuración de aplicaciones para la reproducción de video basada en web desarrollada con HTTP Apache

Para la reproducción, en el cliente, fue necesario configurar un servidor de http apache para cada de las diferentes técnicas de streaming adaptativo.

A continuación, se presenta una breve descripción del diagrama de flujo mostrado en la

Figura 3.3, el cual resume el funcionamiento general de los reproductor para las diferentes técnica de *streaming* adaptativo: DASH, HLS, HDS y HSS.

- *Chequeo de conexión con el servidor*: Al ingresar la url correspondiente, se realiza la petición al servidor, si éste se encuentra con las condiciones esperadas de canal, responde a la petición.
- *Inicio de petición del manifiesto*: Al establecer una conexión adecuada, envía el manifiesto dentro del cual se encuentra las diferentes resoluciones conforme a el ancho de banda disponible del canal.
- *Creación de variables, objetos y métodos*: Elementos necesarios para el funcionamiento tanto del reproductor como de la parte gráfica.
- *Reproductores*: En este bloque se seleccionan los reproductores respectivos para una de las técnicas de Streaming adaptativo, entre las cuales se tienen: DASH, HLS, HDS, HSS.
- *Dash: (Dymamic Adaptative Streaming Over HTTP)*
- *¿Se encuentra en pantalla el botón stop?*: Si el botón *stop* se encuentra disponible en la pantalla, es que la conexión con el servidor se realizó exitosamente, si se presiona se detiene la reproducción, sino se presiona se pregunta si el objeto del reproductor se encuentra vacío.
- *¿Se detiene la reproducción?*: Se hace uso del método *unload* de *shaka player*, el cual retira la conexión con el servidor cerrando el canal.
- *¿El objeto del reproductor se encuentra vacío?*: El reproductor cuenta con un objeto que contiene los diferentes métodos, que garantizan la reproducción, esto se logra al emplear el método *player* de la clase *shaka player*. Si este objeto se encuentra vacío se crea el reproductor; si este no es el caso, es porque el reproductor ya está en marcha.
- *Crear el reproductor*: Se utiliza un objeto llamado video el cual almacena los *WebM*, los cuales vienen empaquetados en DASH con velocidad de bits adaptable, se

debe recordar que *WebM* es un formato de archivo de video empleado en HTML5 basado en el contenedor de archivos *matroska* para videos libres de derechos de autor, de ahí se pasa al constructor de *player*.

- *El reproductor ya está en funcionamiento*: El reproductor ya está en funcionamiento empleando el formato DASH.
- *Establecer el ancho de banda proporcionado por el manifiesto*: Mediante la clase *Shaka* útil y el método *EWMABandwidthEstimator* se obtiene el ancho de banda del canal, con el fin de comparar con el manifiesto y determinar la resolución que debe adoptar el reproductor.
- *¿Utiliza DashSource?*: Mediante el método *DashVideoSource* de la clase *shaka player*, se ingresa la *url* y el ancho de banda soportado. Da inicio a la reproducción de DASH.
- *¿Source se encuentra vacío?*: *Source* es el objeto que contiene los archivos que el método *DashVideoSource* retornó como archivos de reproducción para el método *player*. Si éste se encuentra vacío, se debe crear, de lo contrario se ha recibido los archivos de reproducción con la resolución esperada.
- *Recibir los datos directamente del manifiesto*: Al retornar el método *DashVideoSource* se almacena dentro de *source*, dentro de este proceso se encuentran los archivos con los datos y la resolución que debe aparecer en pantalla.
- *Reproducción del video con las características esperadas*: Mediante la clase *player* se realiza la carga y reproducción del video a través del método *load* el cual recibe como parámetro *source*.
- *Gráfica*: Mediante el uso de la librería de gráficas *chart Bundle*, se realiza una gráfica de tipo línea con la librería de *javascript chart bundle*. Esta gráfica compara el ancho de banda por segundo disponibles para el canal, esto se realiza con el fin de determinar los cambios de resolución, ya que algunas veces a simple vista no se alcanzan a observar.
- *Gráfica de resolución*: Utilizando el ancho de banda y conociendo la relación ancho de banda resolución, tal como lo indica el manifiesto que aporta las diferentes resoluciones con respecto al ancho de banda, se delimita los anchos de banda para indicar cuál es la resolución observada (igualmente por segundo), con el fin de determinar si existen cambios en la resolución.

- *Promedio de Resolución*: De acuerdo a la recomendación ITU.T P.1203, se debe determinar la resolución en periodos de 20 segundos, dentro del script existe un *timer* de 20 segundos, para realizar un promedio con las resoluciones tomadas en ese periodo de tiempo.
- *Generar el archivo de texto plano (txt)*: Dentro de la interfaz, el botón crear archivo, crea un archivo *.txt* con los valores de las resoluciones promedios, cada 20 segundos, durante el tiempo de reproducción del video.
- *HLS (HTTP Live Streaming)*: Es el protocolo que emplea *apple* para el videostreaming, al igual que DASH, se fragmenta en pequeños ficheros que son descargados por el cliente mediante http.
- *Uso del método canPlay*: Emplea el *x-webkit-airplay* el cual es un módulo de *apple* para la reproducción en html5. Este método *canPlay* obtiene del manifiesto los atributos tales como el tipo de compresión, los códecs y la url puede realizar la reproducción del video enviado por el servidor.
- *HDS (HTTP Dynamic Streaming)*: Es el reproductor de video streaming empleado por *Adobe*, el cual ejecuta el módulo de *adobe flash player*. Este módulo, extrae una serie de parámetros tales como la url, atributos que indican si es *live* o *demand*, parámetros de la calidad, entre otros; los cuales son necesarios para la reproducción acorde a la resolución indicada por el ancho de banda.
- *HSS (Smooth Streaming)*: Es el protocolo de transmisión de *Microsoft* de video por internet. Utiliza El módulo *player Silverlight*, el cual es una herramienta que se invoca en el reproductor y que a través del su gestor interactivo permite la reproducción.

En la siguiente sección, se muestran los *script* desarrollados en html y *javascript* para cada reproductor que soportan las diferentes técnicas de streaming adaptativo.

– **Aplicación desarrollada para reproducción de DASH**

El código desarrollado en html y javascript para el reproductor de DASH, puede ser descargado del siguiente link:

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_Dash/

La Figura 3.4 muestra el reproductor implementado.

– **Aplicación desarrollada para reproducción de HDS**

El código desarrollado en html y javascript para el reproductor de HDS, se puede consultar y descargar del siguiente link:

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_HDS/

La Figura B.11 muestra el reproductor implementado.

Hector Fabio Bermudez Orozco

Estudiante PhD. en Ingeniería Telemática-Universidad del Cauca

Flash HTTP Player Live Video Streaming



Figura B.11. Reproductor HDS

– **Aplicación desarrollada para reproducción de HLS**

El código desarrollado en html y javascript para el reproductor de HLS, se puede consultar y descargar del siguiente link:

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_HLS/Reproductor_HLS.html

La Figura B.12. Reproductor HLS muestra el reproductor de video implementado.

Hector Fabio Bermudez Orozco

Estudiante PhD. en Ingeniería Telemática-Universidad del Cauca

HLS-Player Live Video Streaming



Figura B.12. Reproductor HLS

– **Aplicación desarrollada para reproducción de HSS**

El código desarrollado en html y javascript para el reproductor de HSS, se puede consultar y descargar del siguiente link:

http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Reproductor_HSS/Reproductor_HSS.html

La Figura B.13 muestra el reproductor implementado.

Hector Fabio Bermudez Orozco

Estudiante PhD. en Ingeniería Telemática-Universidad del Cauca

Silverlight Player Live Video Streaming



Figura B.13. Reproductor HSS

B.2 Escenario Real

El diagrama general utilizado en la construcción del escenario real, se aprecia en la Figura 3.8. Adicionalmente, la Figura B.14. presenta con mayor detalle la distribución de los elementos hardware y su respectiva interconexión.

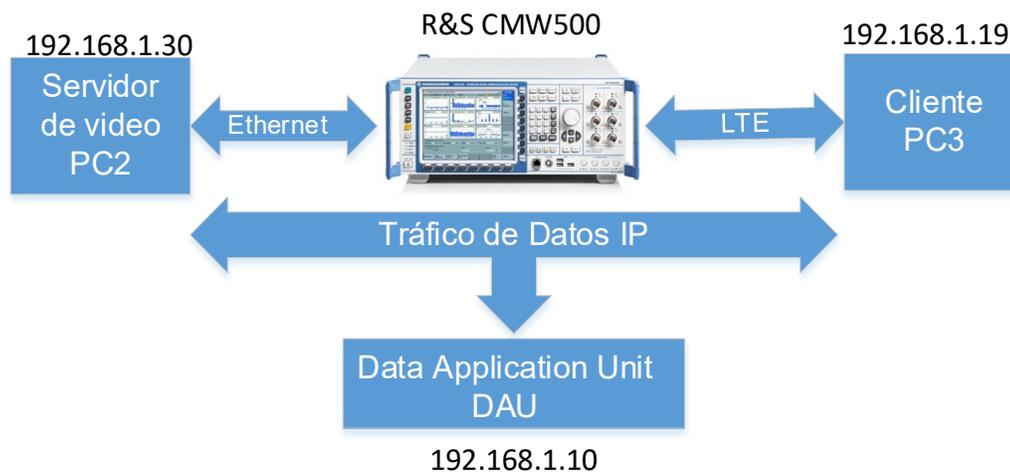


Figura B.14. Configuración hardware del escenario real

En la configuración, se debe de tener en cuenta lo siguiente:

- Utilizar el CMW500 como un generador de señales, lo cual permite que trabaje como una estación base en una red LTE.
- Conectar el CMW500 a través de Ethernet a un servidor de video, para este caso el Wowza Streaming Engine, mediante la aplicación DAU (Data Application Unit).
- Realizar la comunicación inalámbrica LTE entre el UE y la estación base (CMW500). Para esta actividad es necesario utiliza un Modem-LTE USB conectado al PC3.
- Para realizar la conexión de los elementos anteriores, se configuran todos los equipos con direcciones IP de la misma red (ver Figura B.14), de la siguiente manera:
 - 192.168.1.10/24 para el DAU
 - 192.168.1.30/24 para el Servidor de vídeo.
 - 192.168.1.20/24 para el UE.

A continuación, se realiza una breve descripción de la configuración individual del CMW500 utilizado en el escenario real. La configuración del PC2 y PC3 ya realizó en la sección anterior, el único cambio presentado para este escenario es la configuración de las direcciones de red que se observan en la Figura B.14.

B.2.1 R&S CMW500 generador de señales

Al iniciar el dispositivo, la primera pantalla de la aplicación del instrumento, muestra dos opciones a elegir (ver Figura B.15). Estas opciones van a determinar la función que va a realizar el R&S CMW500.

Opción 1: el R&S CMW500 actúa como analizador del sistema.

Opción 2: el R&S CMW500 actúa como un generador de señal de radiofrecuencia de un sistema general o para un estándar específico.



Figura B.15. Primera pantalla del programa

La opción 2 da la posibilidad de seleccionar entre varios modos de funcionamiento (ver Figura B.16) , como generador de señales del R&S CMW500, entre las cuales se tienen:

R&S CMW500 como un generador de señal de radiofrecuencia genérico que puede proporcionar una señal RF de frecuencia constante o de frecuencias y niveles configurables.

R&S CMW500 simula la función de una estación base móvil sobre el estándar GSM. Con esta opción se puede realizar llamadas por conmutación de circuitos y transmitir paquetes de datos por conmutación de paquetes sobre el sistema avanzado de GSM, GPRS.

R&S CMW500 representa la función de una estación base móvil apoyada sobre el estándar LTE.

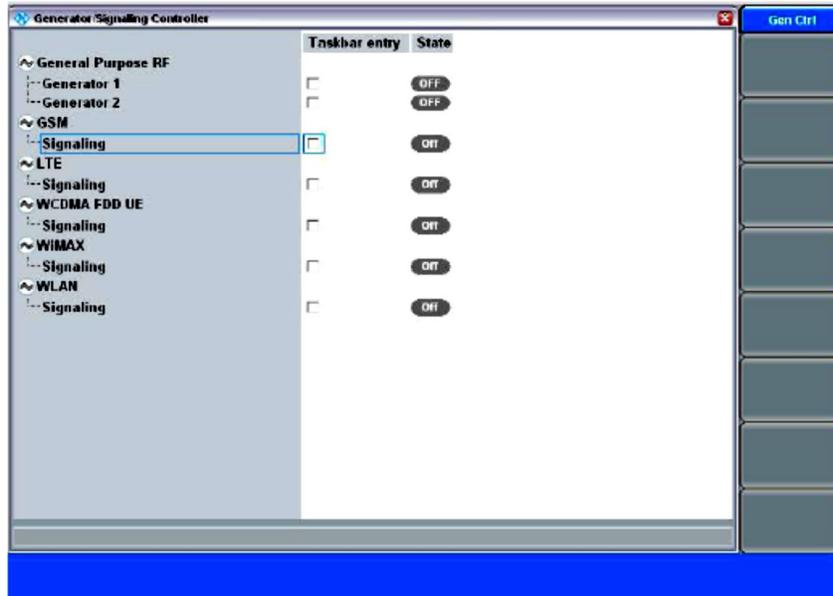


Figura B.16. Modos de funcionamiento del R&S CMW500

Para nuestro escenario, se selecciona la opción 2. Luego se escoge el estándar LTE.

Los parámetros de la red móvil, para cualquier tecnología soportada, se seleccionan automáticamente por el R&SCMW500. Algunos se pueden modificar por el usuario a través de la interfaz gráfica. A continuación, en las Figura B.17 - Figura B.20 se presentan los parámetros más relevantes de la tecnología LTE, y que pueden ser modificados por el usuario.

Frequency Range	FDD bands and TDD bands					
Channel bandwidth 1 Resource Block (RB) =180 kHz	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
	6 RB	15 RB	25 RB	50 RB	75 RB	100 RB
Modulation Schemes	Downlink	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	Uplink	QPSK, 16QAM, 64QAM (⇔ optional for handset)				
Multiple Access	Downlink	OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)				
	Uplink	SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)				
MIMO technology	Downlink	Wide choice of MIMO configuration options for transmit diversity, spatial multiplexing, and cyclic delay diversity (max. 4 antennas at base station and handset)				
	Uplink	Multi-user collaborative MIMO				
Peak Data Rate	Downlink	150 Mbps (UE category 4, 2x2 MIMO, 20 MHz) 300 Mbps (UE category 5, 4x4 MIMO, 20 MHz)				
	Uplink	75 Mbps (20 MHz)				

Figura B.17. Categorías del UE – LTE (Uplink y Downlink)

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL, low}$	$F_{UL, high}$	$F_{DL, low}$	$F_{DL, high}$	
1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	1755 MHz	2110 MHz	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	FDD
6	830 MHz	840 MHz	875 MHz	885 MHz	FDD
7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	1784.9 MHz	1844.9 MHz	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	1770 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	1452.9 MHz	1475.9 MHz	1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz	716 MHz	728 MHz	746 MHz	FDD
13	777 MHz	787 MHz	746 MHz	756 MHz	FDD
14	788 MHz	798 MHz	758 MHz	768 MHz	FDD
17	704 MHz	716 MHz	734 MHz	746 MHz	FDD
18	815 MHz	830 MHz	860 MHz	875 MHz	FDD
19	830 MHz	845 MHz	875 MHz	890 MHz	FDD
20	832 MHz	862 MHz	791 MHz	821 MHz	FDD

Figura B.18. Bandas de frecuencia LTE/LTE-A (FDD)

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL, low}$	$F_{UL, high}$	$F_{DL, low}$	$F_{DL, high}$	
21	1447.9 MHz	1462.9 MHz	1495.9 MHz	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	3500 MHz	3510 MHz	3600 MHz	FDD
23	2000 MHz	2020 MHz	2180 MHz	2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz	1660.5 MHz	1525 MHz	1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	1915 MHz	1930 MHz	1995 MHz	FDD
26	814 MHz	849 MHz	859 MHz	894 MHz	FDD
27	807 MHz	824 MHz	852 MHz	869 MHz	FDD
28	703 MHz	748 MHz	758 MHz	803 MHz	FDD
33	1900 MHz	1920 MHz	1900 MHz	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	2025 MHz	2010 MHz	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	1910 MHz	1850 MHz	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	1990 MHz	1930 MHz	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	1930 MHz	1910 MHz	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	1920 MHz	1880 MHz	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	TDD
41	2496 MHz	2690 MHz	2496 MHz	2690 MHz	TDD
42	3400 MHz	3600 MHz	3400 MHz	3600 MHz	TDD
43	3600 MHz	3800 MHz	3600 MHz	3800 MHz	TDD

Figura B.19. Bandas de frecuencia LTE/LTE-A (FDD/TDD)

E-UTRA band / channel bandwidth						
E-UTRA Band	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1			Yes	Yes	Yes	Yes
2	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
3	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
4	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
5	Yes	Yes	Yes	Yes		
6			Yes	Yes		
7			Yes	Yes	Yes	Yes
8	Yes	Yes	Yes	Yes		
9			Yes	Yes	Yes	Yes
10			Yes	Yes	Yes	Yes
11			Yes	Yes		
12	Yes	Yes	Yes	Yes		
13			Yes	Yes		
14			Yes	Yes		
...						
17			Yes	Yes		
...						
33			Yes	Yes	Yes	Yes
34			Yes	Yes	Yes	Yes
35	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
36	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
37			Yes	Yes	Yes	Yes
38			Yes	Yes	Yes	Yes
39			Yes	Yes	Yes	Yes
40			Yes	Yes	Yes	Yes

Figura B.20. Ancho de bandas de canales LTE

La Figura B.21 muestra la configuración final de los parámetros de señalización de la tecnología LTE utilizados en el escenario de emulación.

The screenshot displays the 'LTE Signaling - V3.2.82 - Base V 3.2.70' interface. It is divided into several sections:

- Connection Status:** Shows 'Cell' as active, 'Packet Switched' as OFF, and 'RRC State' as Idle.
- Event Log:** Displays a log entry: '08:18:49 LTE Signaling 3.2.82.4'.
- UE Info:** A dropdown menu is set to 'UE Info', with fields for IMEI, IMSI, Voice Domain Pref..., UE's Usage Setting, Default Bearer (IPv4 address, IPv6 prefix), Dedicated Bearer, and TFT Port Range.
- PCC / SCC1 Configuration:**
 - Operating Band: Band 7, FDD
 - Channel: 3100 Ch (Downlink), 21100 Ch (Uplink)
 - Frequency: 2655.0 MHz (Downlink), 2535.0 MHz (Uplink)
 - Cell Bandwidth: 5.0 MHz (Downlink), 5.0 MHz (Uplink)
 - RS EPRE: -140.8 dBm/15kHz
 - Full Cell BW Pow.: -116.0 dBm
 - PUSCH Open Loop Nom. Power: Advanced...
 - PUSCH Closed Loop Target Power: 0.0 dBm
- Connection Setup:**
 - Sched.: RMC
 - #RB: 25 (Downlink), 25 (Uplink)
 - RB Pos./Start RB: low (Downlink), low (Uplink)
 - Modulation: QPSK (Downlink), QPSK (Uplink)
 - TBS Idx / Value: 5 (Downlink), 2216 (Uplink)
 - Throughput: 1.953 Mbit/s (Downlink), 2.216 Mbit/s (Uplink)

Figura B.21. Ajuste de parámetros LTE en el CMW500

Un aspecto muy importante que debe ser considerado es la selección de parámetros de atenuación externa a la salida y entrada de la señal, sobre todo, en el momento de la selección del tipo de ambiente a trabajar (*Indoor* ó *outdoor*). La atenuación externa a la salida, representa la atenuación de la señal en sentido descendente, de manera que afectara directamente a la potencia recibida en el dispositivo móvil; por otro lado, La atenuación externa a la entrada, considera la atenuación de la señal en sentido ascendente, por lo que va a afectar al nivel de potencia recibida en el R&S CMW500. Para nuestro caso de estudio y después del proceso de calibración definido en [150], se determinó los siguientes valores de atenuación:

Indoor:

Atenuación externa – Output = 0dBm

Atenuación externa – Input = 0 dBm

Outdoor:

Atenuación externa – Output = 40 dBm /verificar en el cuaderno

Atenuación externa – Input = 40 dBm

Para el escenario real en ambiente indoor, se utiliza la antena EM-6116 omnidireccional y para el ambiente outdoor la antena panel direccional 14 IP-G14-F2425-HV (ver Figura B.22), los diferentes parámetros, mostrados en la Tabla B.1, son configurados en el escenario emulado, específicamente en el NS3. Para la implementación, se utilizan dos antenas en cada escenario, una para el enlace ascendente y otra para el enlace descendente.



a)



b)

Figura B.22. Antenas utilizadas en los escenarios reales. a) indoor. b) outdoor

	EM-6116	14 IP-G14-F2425-HV
Rango de frecuencias	2-10 GHz	2.4-2.6 GHz
Ganancia	1dBi	14 dBi
VSWR	2.0:1, máxima	1.70:1
Impedancia	50Ω	50Ω
Conector	Tipo N, hembra	Tipo N, hembra
Polarización	Vertical	Horizontal o Vertical
HPBW (-3dB)	omnidireccional	30°

Tabla B.1. Parámetros generales de las antenas utilizadas

B.2.2 Configuración de la DAU (Data Application Unid)

La Unidad de aplicación de datos es un elemento interno del R&S CMW500 utilizado para aplicaciones que requieran intercambio de paquetes de datos. Proporciona servicios internos IP como transferencia de archivos por FTP (File Transfer Protocol), navegación web a través de HTTP (Hypertext Transport Protocol), y soporte IMS (IP Multimedia Subsystem) y DNS [104]. Para configurar la DAU, se deben de seguir los siguientes pasos:

- Acceder al menú configuración (tecla "Set up" del R&S CMW500).
- Dentro del menú "System", se selecciona la opción "Go to config".

Existen dos formas de ajustar los parámetros, dependiendo del modo de operación de la DAU, el cual puede ser: establecer comunicación entre el dispositivo bajo prueba y el R&S CMW500 o establecer comunicación entre el dispositivo bajo prueba y un destino final que se encuentra en una red local externa. En nuestro caso se utiliza la segunda opción, ya que el servidor de vídeo se encuentra ubicado en una red externa se comunica con el R&S CMW500 a través de la interfaz "LAN DAU". Posteriormente se configuran los parámetros para este tipo de comunicación mediante asignación dinámica a través del protocolo DHCP o configuración estática.

La Figura B.23 muestra la captura de pantalla del R&S CMW500 donde se ilustran los pasos requeridos para conectar el dispositivo móvil a la estación base:

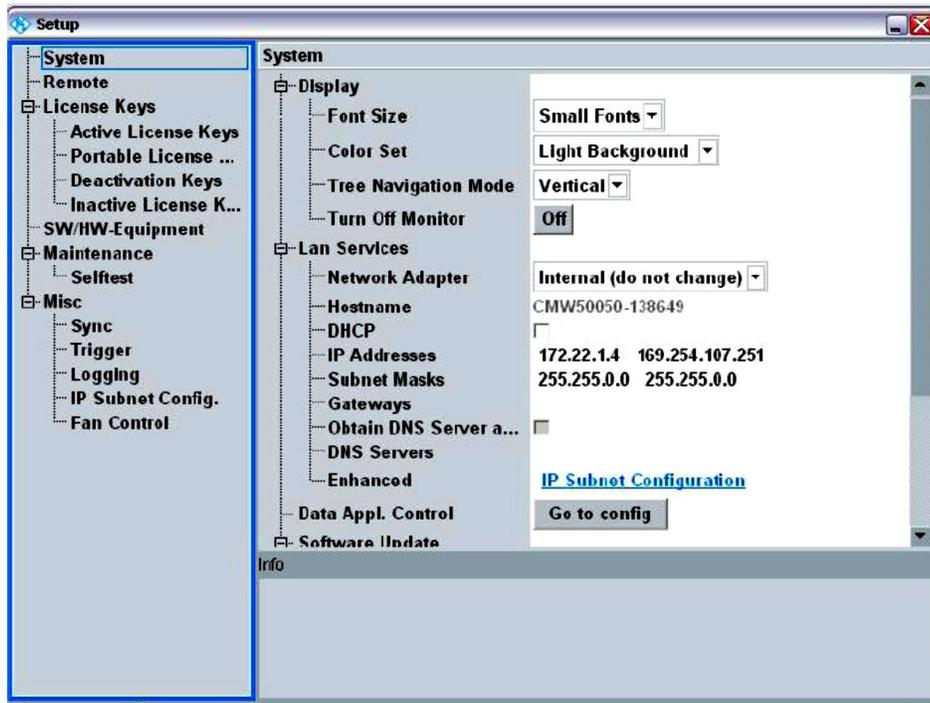


Figura B.23. Acceso a la configuración de la DAU.

B.2.3 Establecimiento de la comunicación inalámbrica

Después de configurada la conexión con la unidad DAU, es necesario generar por parte del R&S CMW500 la señal LTE. En la Figura B.24 se observa la captura de pantalla para realizar este proceso.

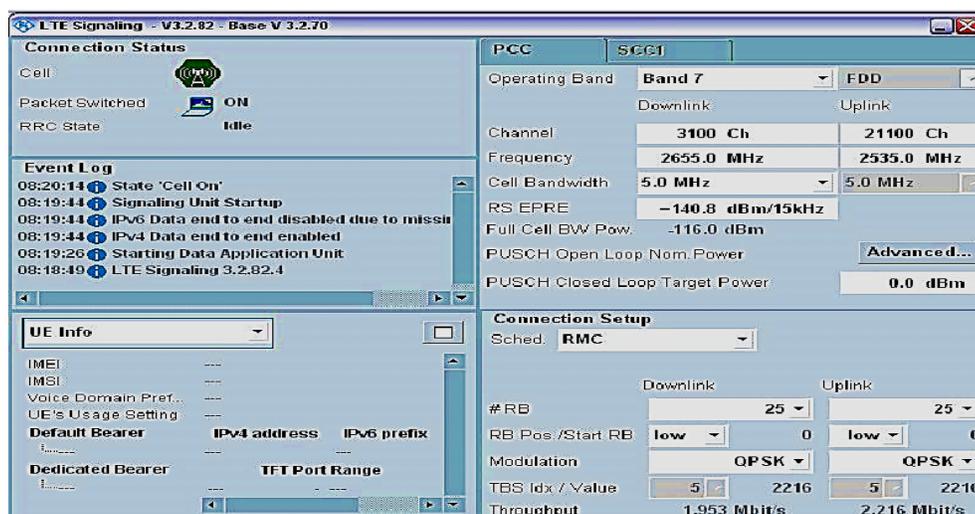


Figura B.24. Generación de señal LTE

Aunque se ha generado el proceso de señalización de forma correcta, aún no se ha establecido la conexión con el UE. Para lo cual es necesario, en el UE, seleccionar la red para conectarse con la estación base. La captura de pantalla del UE se muestra en la Figura B.25.

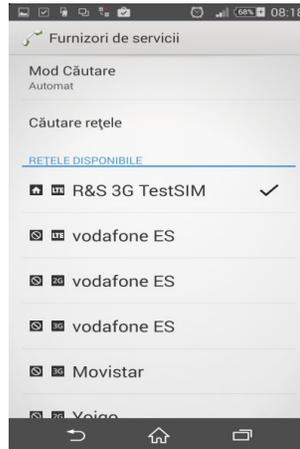


Figura B.25. Selección de la red móvil desde el UE

En la Figura B.26 se observa la captura de pantalla del R&S CMW500 donde el proceso exitoso de la conexión entre la estación base y el respectivo UE.

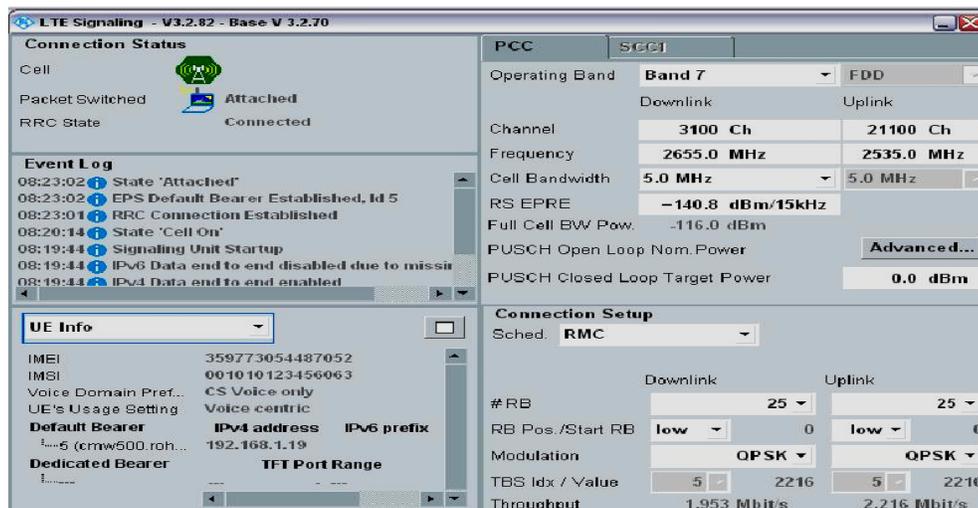


Figura B.26. Conexión establecida entre la estación base y el UE

Anexo C

C. Pruebas ANOVA

En esta sección se presenta los resultados obtenidos al aplicar la prueba estadística ANOVA para cada uno de los parámetros QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *Jitter* y *throughput*) en el escenario de experimentación en ambientes exteriores en el lado del cliente para diferentes modelos de propagación.

Para la aplicación de la prueba se define la hipótesis nula a validar como: “las medidas de desempeño en términos de métricas de QoS obtenidas en un sistema LTE emulado con NS-3, no presentan diferencias estadísticas significativas con las medidas realizadas en un sistema LTE real para el servicio de LVS”. La Tabla 3.9, presentada en la sección 3.3.2 corresponden al resumen de la totalidad de las pruebas realizadas.

C.1 Prueba ANOVA para escenarios *Outdoor*

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas de ANOVA para los diferentes escenarios de experimentación en exteriores y los diferentes protocolos utilizados en el lado del cliente para diferentes modelos de propagación. Se presentan los resultados para cada uno de los parámetros de QoS (*packet loss*, *interpacket delay*, *Jitter* y *throughput*). El resumen de estos resultados se presentan en la Tabla 3.9

C.1.1 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro *Packet loss* con el protocolo RTMP en el lado del Cliente

- Modelo de propagación Nakagami $-m \{0,5; 1; 3; 5; 7\}$

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
m=0.5	0.5826	0.6102
Real	0.036600	0.093000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=0.5	2	1.1928	0.5964	0.00038088
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.28259856	1	0.28259856	286.704164	0.00346977	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00197136	2	0.00098568			
Total	0.28456992	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F > F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=0.5$ la hipótesis nula es rechazada.

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
m=1	1.5457	3.0651
Real	0.036600	0.093000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=1	2	4.6108	2.3054	1.15428818
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5.02028836	1	5.02028836	8.6865317	0.09841887	18.5128205
Dentro de los grupos	1.15587866	2	0.57793933			
Total	6.17616702	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=1$ la hipótesis nula es aceptada.

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
m=3	0.1480	0.3620
Real	0.036600	0.093000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=3	2	0.51	0.255	0.022898
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.03617604	1	0.03617604	2.95453536	0.22777629	18.5128205
Dentro de los grupos	0.02448848	2	0.01224424			
Total	0.06066452	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=3$ la hipótesis nula es aceptada.

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
m=5	0.0549	0.1039

Real	0.036600	0.093000
------	-----------------	-----------------

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=5	2	0.15883	0.079415	0.00120197
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.000213598	1	0.0002136	0.15298264	0.73343642	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00279245	2	0.00139623			
Total	0.003006049	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=5$ la hipótesis nula es aceptada.

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
m=7	0.019004	0.011817
Real	0.036600	0.093000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=7	2	0.030821	0.0154105	2.5826E-05
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.00243932	1	0.00243932	3.01839129	0.22445767	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00161631	2	0.00080815			
Total	0.00405563	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=7$ la hipótesis nula es aceptada.

- Modelo de propagación Hybridbuilding

	Packet Loss	
	1128 kbps (480p)	2658 kbps (720p)
Hybridbuilding	0.0090	0.0124
Real	0.036600	0.093000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Hybridbuilding	2	0.021414	0.010707	5.8004E-06
Real	2	0.1296	0.0648	0.00159048

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.002926053	1	0.00292605	3.66608851	0.19562272	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00159628	2	0.00079814			
Total	0.004522333	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, utilizando un modelo de propagación *Hybridbuilding* la hipótesis nula es aceptada.

De los resultados de la prueba ANOVA para el parámetro de *Packet Loss* en el cliente, se puede evidenciar que únicamente el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=0.5$ no cumple la hipótesis nula.

C.1.2 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Interpacket delay con el protocolo RTMP en el lado del Cliente

- Modelo de propagación Nakagami $-m \{0,5; 1; 3; 5; 7\}$

Interpacket delay		
	1128 kbps	2658 kbps
m=0,5	0.2555	0.1833
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=0,5	2	0.4388	0.2194	0.00260642
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.025424303	1	0.025424303	15.7796085	0.057921668	18.51282051
Dentro de los grupos	0.003222425	2	0.001611213			
Total	0.028646728	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=0.5$ la hipótesis nula es aceptada.

Interpacket delay		
	1128 kbps	2658 kbps
m=1	0.1434	0.1487
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=1	2	0.2921	0.14605	1.4045E-05
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.00741321	1	0.00741321	23.5321324	0.039964931	18.51282051
Dentro de los grupos	0.00063005	2	0.000315025			
Total	0.00804326	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F > F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=1$ la hipótesis nula es rechazada.

	Interpacket delay	
	1128 kbps	2658 kbps
m=3	0.14102	0.087340
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=3	2	0.22836	0.11418	0.00144077
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.002940893	1	0.002940893	2.85971113	0.232893159	18.51282051
Dentro de los grupos	0.002056776	2	0.001028388			
Total	0.004997669	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket dela* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=3$ la hipótesis nula es aceptada.

	Interpacket delay	
	1128 kbps	2658 kbps
m=5	0.100780	0.068190
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=5	2	0.16897	0.084485	0.00053105
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.000601966	1	0.000601966	1.04958193	0.413337917	18.51282051
Dentro de los grupos	0.001147059	2	0.00057353			
Total	0.001749025	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=5$ la hipótesis nula es aceptada.

	Interpacket delay	
	1128 kbps	2658 kbps
m=7	0.012207	0.006601
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=7	2	0.018808	0.009404	1.5714E-05
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.0025549	1	0.0025549	8.08872192	0.10459013	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00063172	2	0.00031586			
Total	0.00318662	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami* con $m=7$ la hipótesis nula es aceptada.

- *Modelo de propagación Hybridbuilding*

	Retardo Promedio entre paquetes Rx	
	1128 kbps	2658 kbps
Hybridbuilding	0.0082	0.0067
Real	0.077500	0.042400

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
hybrid	2	0.014882	0.007441	1.1735E-06
Real	2	0.1199	0.05995	0.000616

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.002757195	1	0.002757195	8.93483823	0.096065077	18.51282051
Dentro de los grupos	0.000617179	2	0.000308589			
Total	0.003374374	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, utilizando un modelo de propagación *Hybridbuilding* la hipótesis nula es aceptada.

De los resultados de la prueba ANOVA para el parámetro de *Interpacket delay* en el cliente, se puede evidenciar que únicamente el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=1$ no cumple la hipótesis nula.

C.1.3 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Jitter con el protocolo RTMP en el lado del Cliente

- *Modelo de propagación Nakagami –m {0,5; 1; 3; 5; 7}*

	Jitter en Rx	
	1128 kbps	2658 kbps
m=0.5	0.494600	0.658850
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=3	2	1.15345	0.576725	0.01348903

Real	2	0.27131	0.135655	0.00590676
------	---	---------	----------	------------

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.194542745	1	0.19454274	20.0603071	0.04640709	18.5128205
Dentro de los grupos	0.019395789	2	0.00969789			
Total	0.213938534	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=0.5$ la hipótesis nula es rechazada.

Jitter en Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=1	1.800660	3.049220
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=0,5	2	4.84988	2.42494	0.77945104
Real	2	0.27131	0.135655	0.00590676

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5.240825811	1	5.24082581	13.3463393	0.06743592	18.5128205
Dentro de los grupos	0.785357795	2	0.3926789			
Total	6.026183606	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=1$ la hipótesis nula es aceptada.

Jitter en Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=3	0.852340	1.586280
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=1	2	2.43862	1.21931	0.269333
Real	2	0.27131	0.135655	0.005906

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.1743081	1	1.174308	8.53295	0.099933	18.51282
Dentro de los grupos	0.275240	2	0.137620			
Total	1.4495488	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=3$ la hipótesis nula es aceptada.

Jitter en Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=5	0.091030	0.234063
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=5	2	0.325093	0.1625465	0.01022922
Real	2	0.27131	0.135655	0.00590676

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.000723153	1	0.00072315	0.08963235	0.79289173	18.5128205
Dentro de los grupos	0.016135978	2	0.00806799			
Total	0.01685913	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=5$ la hipótesis nula es aceptada.

Jitter en Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=7	0.039200	0.125800
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=7	2	0.165	0.0825	0.00374978
Real	2	0.27131	0.135655	0.00590676

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.00282545	1	0.00282545	0.58518985	0.52422439	18.5128205
Dentro de los grupos	0.00965654	2	0.00482827			
Total	0.01248199	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=7$ la hipótesis nula es aceptada.

- *Modelo de propagación Hybridbuilding*

	Jitter en Rx	
	1128 kbps	2658 kbps
Hybridbuilding	0.019200	0.090690
Real	0.081310	0.1900

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
hybrid	2	0.10989	0.054945	0.00255541
Real	2	0.27131	0.135655	0.00590676

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.006514104	1	0.0065141	1.53958277	0.34048377	18.5128205
Dentro de los grupos	0.008462168	2	0.00423108			
Total	0.014976272	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Jitter* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Hybridbuilding* la hipótesis nula es aceptada.

De los resultados de la prueba ANOVA para el parámetro de *Jitter* en el cliente, se puede evidenciar que solo el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=0.5$ no se cumple la hipótesis nula.

C.1.4 Resultados de la prueba ANOVA para el parámetro Throughput con el protocolo RTMP en el lado del Cliente

- *Modelo de propagación Nakagami –m {0,5; 1; 3; 5; 7}*

	Throughput Rx	
	1128 kbps	2658 kbps
m=0,5	44982.95	57741.02
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=0,5	2	102723.97	51361.985	81384175.1
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.10653E+11	1	1.1065E+11	18.6117224	0.05291528	18.5128205
Dentro de los grupos	12710152698	2	6355076349			
Total	1.23363E+11	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F > F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=0.5$ la hipótesis nula es rechazada.

Throughput Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=1	82373.00	99251.84
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=1	2	181624.84	90812.42	142447620
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	85963167291	1	8.5963E+10	13.4620175	0.06691331	18.5128205
Dentro de los grupos	12771216143	2	6385608072			
Total	98734383435	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=1$ la hipótesis nula es aceptada.

Throughput Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=3	176403.19	207669.49
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=3	2	384072.68	192036.34	488790758
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	36852803410	1	3.6853E+10	5.61885067	0.14122575	18.5128205
Dentro de los grupos	13117559281	2	6558779641			
Total	49970362691	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=3$ la hipótesis nula es aceptada.

Throughput Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=5	274538.56	418398.68
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=5	2	692937.24	346468.62	1.0348E+10
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1409143487	1	1409143487	0.12265882	0.75961393	18.5128205
Dentro de los grupos	22976635586	2	1.1488E+10			
Total	24385779073	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=5$ la hipótesis nula es aceptada.

Throughput Rx		
	1128 kbps	2658 kbps
m=7	547652.95	738962.27
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
m=7	2	1286615.22	643307.61	1.83E+10
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	67236712998	1	6.7237E+10	4.34789518	0.17239204	18.5128205
Dentro de los grupos	30928396483	2	1.5464E+10			
Total	98165109481	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F < F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=7$ la hipótesis nula es aceptada.

- Modelo de propagación Hybridbuilding

	Throughput Rx	
	1128 kbps	2658 kbps
Hybridbuilding	827998.93	946116.44
Real	304544.080000	463470.280000

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
hybrid	2	1774115.37	887057.685	6975873084
Real	2	768014.36	384007.18	1.2629E+10

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.5306E+11	1	2.5306E+11	25.8163159	0.03662066	18.5128205
Dentro de los grupos	19604641608	2	9802320804			
Total	2.72664E+11	3				

Según los resultados de la prueba, se aprecia que el valor del Factor $F > F_c$, por lo cual se puede afirmar que para el parámetro de *Throughput* en el cliente, utilizando un modelo de propagación *Hybridbuilding* la hipótesis nula es rechazada.

De los resultados de la prueba ANOVA para el parámetro de *Throughput* en el cliente, se puede evidenciar que con los modelos de propagación de *Nakagami-m* con $m=0.5$ y *Hybridbuilding* no cumple la hipótesis nula.

Todos los resultados obtenidos con la prueba ANOVA, para los diferentes parámetros de QoS y modelos de propagación en el lado del cliente, se encuentran registrados de forma resumida en la Tabla 3.9. En esta tabla se resalta en negrita los valores que no cumplen con la hipótesis nula. Del análisis de esta tabla, se observa que el modelo de propagación que cumple con las hipótesis nulas para todos los parámetros de QoS analizados es el modelo de propagación de *Nakagami-m* con $m=5$.

Esta misma prueba se aplica a los parámetros de QoS (*jitter*, *interpacket delay*, *Throughput*) en el lado del servidor, ver Tabla 3.8, y para el protocolo DASH (lado cliente y servidor) (ver Tabla 3.9 y Tabla 3.8 respectivamente). Debido a la extensión de dichas pruebas y considerando la longitud del presente documento, se presenta de manera gráfica el resultado del cumplimiento de la prueba ANOVA en el escenario *outdoor* para las resoluciones de 480p y 720p, y protocolos RTPM y DASH, ver Figura 3.23 a Figura 3.26. El proceso de la prueba ANOVA es similar para todos los casos. Adicionalmente, para el escenario *indoor* (lado cliente y servidor) y los protocolos RTPM y RTSP, se presenta el resumen de los resultados obtenidos con la prueba ANOVA las Tabla 3.4 y Tabla 3.5 de la sección 3.3.1.

Anexo D

D Herramientas de apoyo para el modelado de tráfico

En esta sección se presentan las herramientas software construidas en este trabajo y que sirven de apoyo para la construcción del modelado de tráfico. Por otra parte, se presentan los conceptos básicos de las pruebas de bondad y ajuste que fueron utilizadas en la presente investigación. Adicionalmente, se muestra como se realizan las pruebas de bondad y ajuste para un caso particular. Los resultados obtenidos en general fueron consignados de forma resumida en el capítulo 4 de este informe.

D.1 Analizador sintáctico

El *Analizador Sintáctico* identifica los *slice* de audio y video (diferencia entre tiempos de llegada y tamaño), y la clasificación del tipo de *GOP* para los *slice* de video (I, P o B). La descripción general del analizador sintáctico fue presentada en la sección 4.2.2 y su diagrama funcional en la Figura 4.4. En el siguiente link se puede acceder al código desarrollado en Matlab:

<http://www.gituq.edu.co/RepositorioSF/Analizador%20Sintactico/>

D.2 Pruebas de bondad y ajuste

Como se mencionó en el capítulo 4, las pruebas de bondad de ajuste de un modelo estadístico describen lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad en general resumen la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio. Tales medidas se pueden emplear en el contraste de hipótesis.

Para calcular si una distribución dada se ajusta a un conjunto de datos, se pueden utilizar las siguientes pruebas:

- Prueba de Kolmogórov-Smirnov.
- Prueba de χ^2 de Pearson.
- Prueba de Anderson-Darling.
- Criterio de Cramér-von Mises.
- Test de Shapiro–Wilk.

D.2.1 Prueba de Kolmogórov-Smirnov

La prueba de bondad y ajuste de Kolmogórov-Smirnov (K-S) es una prueba no paramétrica de mayor exactitud ya que trabaja con las distribuciones de probabilidad acumuladas CDF; adicionalmente, es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución [120]. Esta prueba determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. El estadístico de contraste se define de la siguiente forma:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \leq x \\ 0 & \text{Alternativa} \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

Para las dos colas el estadístico viene dado por:

$$D_n^+ = \max(F_n(x) - F(x)) \quad (\text{D.1})$$

$$D_n^- = \max(F(x) - F_n(x)) \quad (\text{D.2})$$

Así pues, D es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $F_n(x)$ y la frecuencia acumulada teórica $F(x)$, obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula.

Si los valores observados $F_n(x)$ son similares a los esperados $F(x)$, el valor de D será pequeño. Cuanto mayor sea la discrepancia entre la distribución empírica $F_n(x)$ y la distribución teórica, mayor será el valor de D.

Por tanto, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será de la forma:

$$\begin{aligned} \text{Si } D \leq D_\alpha &\rightarrow \text{Aceptar Hipótesis} \\ \text{Si } D > D_\alpha &\rightarrow \text{Rechazar Hipótesis} \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

El valor α corresponde al nivel de significación del contraste.

D.2.2 Prueba χ^2 de Pearson [151]

La prueba χ^2 de Pearson se considera una prueba no paramétrica que mide la discrepancia entre una distribución observada y otra teórica (bondad de ajuste), indicando en qué medida las diferencias existentes entre ambas, de haberlas, se deben al azar en el contraste de hipótesis. También se utiliza para probar la independencia de dos variables entre sí. El estadístico se define de la siguiente manera:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\text{Observada}_i - \text{Teórica}_i)^2}{\text{Teórica}_i} \quad (\text{D.4})$$

Cuanto mayor sea el valor de χ^2 , menos verosímil es que la hipótesis nula (que asume la igualdad entre ambas distribuciones) sea correcta. De la misma forma, cuanto más se aproxima a cero el valor de chi-cuadrado, más ajustadas están ambas distribuciones.

El criterio de decisión de la prueba χ^2 de Pearson define que no se rechaza H_0 cuando $\chi^2 < \chi_t^2((r-1)(k-1))$. En caso contrario se rechaza. Donde t representa el valor proporcionado por las tablas en [152], según el nivel de significación estadístico elegido.

$$\chi^2 < \chi_t^2((r-1)(k-1)) \quad (\text{D.5})$$

D.2.3 Prueba de Anderson-Darling

En estadística, la prueba de Anderson-Darling es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. La fórmula para el

estadístico A determina si los datos $\{Y_1 < \dots < Y_N\}$ (observar que los datos se deben ordenar) vienen de una distribución con función acumulativa F . $A^2 = -N - S$, donde:

$$S = \sum_{k=1}^N \frac{2k-1}{N} [\ln F(Y_k) + \ln(1 - F(Y_{N+1-k}))] \quad (\text{D.6})$$

El estadístico de la prueba se puede entonces comparar contra las distribuciones del estadístico de prueba (dependiendo que F se utiliza) para determinar el P-valor.

La prueba de Anderson-Darling es una prueba estadística que determina si una muestra de datos se extrae de una distribución de probabilidad. En su forma básica, la prueba asume que no existen parámetros a estimar en la distribución que se está probando, en cuyo caso la prueba y su conjunto de valores críticos siguen una distribución libre. Sin embargo, la prueba se utiliza con mayor frecuencia en contextos en los que se está probando una familia de distribuciones, en cuyo caso deben ser estimados los parámetros de esa familia y debe tenerse estos en cuenta a la hora de ajustar la prueba estadística y sus valores críticos. Cuando se aplica para probar si una distribución normal describe adecuadamente un conjunto de datos, es una de las herramientas estadísticas más potentes para la detección de la mayoría de las desviaciones de la normalidad.

D.2.4 Criterio de Cramér-von Mises [153]

En estadística el criterio de Cramér-von Mises se emplea para juzgar la bondad de una función de distribución acumulada F^* comparada con una función de distribución empírica F_n , o para comparar dos distribuciones empíricas. También se utiliza como parte de otros algoritmos, tal como la estimación de la distancia mínima. Se define como:

$$\omega^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |F_n(x) - F^*(x)|^2 dF^*(x) \quad (\text{D.7})$$

Aplicándolo a una única muestra, F^* es la distribución teórica y F_n es la empírica. Alternativamente las dos distribuciones pueden ser estimadas empíricamente; esto se conoce como un caso de dos muestras.

El criterio lleva los apellidos de *Harald Cramér* y *Richard Edler von Mises*, quienes fueron los primeros en exponerlo entre los años 1928-1930. La generalización de las dos muestras es obra de *Theodore Wilbur Anderson*.

D.2.5 Test de Shapiro–Wilk [154]

El Test de Shapiro–Wilk se usa en estadística para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Se plantea como hipótesis nula que una muestra x_1, \dots, x_n proviene de una población normalmente distribuida. Para efectuarla se calcula la media y la varianza muestral, S^2 , y se ordenan las observaciones de menor a mayor. A continuación, se calculan las diferencias entre: el primero y el último; el segundo y el penúltimo; el tercero y el antepenúltimo, etc. y se corrigen con unos coeficientes tabulados por Shapiro y Wilk. Fue publicado en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk. Se considera uno de los test más potentes para el contraste de normalidad, sobre todo para muestras pequeñas ($n < 50$). El estadístico de prueba es:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{D.8})$$

Donde $x_{(i)}$ (con el subíndice i entre paréntesis) es el número que ocupa la i -ésima posición en la muestra (con la muestra ordenada de menor a mayor); $\bar{x} = (x_1 + \dots + x_n)/n$ es la media muestral, en [154] se muestra como calcular las variables a_i . Se rechaza la hipótesis nula de normalidad si el estadístico W es menor que el valor crítico proporcionado por la tabla elaborada por los autores para el tamaño muestral y el nivel de significación dado, ver [152].

D.3 Pruebas de K-S

A continuación, se describe el *script* desarrollado en Matlab, el cual ayuda a medir el grado de similitud entre los datos obtenidos en la práctica con los datos teóricos específicos (hipótesis nula). Adicionalmente, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas de K-S para todos los escenarios de experimentación planteados en este trabajo.

D.3.1 Cálculo de similitud entre la CDF real y la CDF de la Hipótesis H_0

```

%%%% Prueba de Kolmogorov-Smirnov
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Importar datos txt
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
muestras = xlsread('C:\Users\hector\Desktop\Matrices',9);

%%Prueba%%
n = length( muestras );

% Valor critico de la prueba de Kolmogorov-Smirnov
D = 1.22/sqrt( n )           %1.07-80%
% Calculo de las probabilidad observada acumulada
PO = POi( muestras );
POA = POAi( PO );

% Probabilidad esperada acumulada para cada PDF a probar
PEA = evaluareresults( :, 2 ); %Depende de la PDF a validar

% Valor estadistico de prueba
%   length( POA )
C = VEP( POA, PEA )
%%
if( C < D );
    fprintf( 'La hipotesis es aceptada. Confianza 0.95 \n' );
else
    fprintf( 'La hipotesis no puede aceptarse\n' );
end

```

Las funcione POAi.m, POi.m y VEP.m se muestran a continuación:

```

function P = POAi( PO )
    n = length( PO );
    P = zeros( n, 1 );
    P( 1 ) = PO( 1 );
    for i = 2:n
        P( i ) = P( i-1 ) + PO( i );
    end
end
-----

function BinHeight = POi( len )
    [CdfF,CdfX] = ecdf(len,'Function','cdf'); % compute empirical cdf
    BinInfo.rule = 1;
    [~,BinEdge] = internal.stats.histbins(len,[],[],BinInfo,CdfF,CdfX);
    [BinHeight,BinCenter] = ecdfhist(CdfF,CdfX,'edges',BinEdge);
    BinHeight = BinHeight/sum( BinHeight );
end

-----

function c = VEP( POA, PEA )
    dif = abs( POA - PEA );
    c = max( dif );
end

```

D.3.2 Resultados de las pruebas K-S

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de K-S para todos los escenarios de experimentación propuestos en este trabajo, las diferentes tablas presentan los valores obtenidos de la prueba K-S, se muestra el estadístico de prueba (D) y el valor de contraste ($D_{0.05}$) para las posibles hipótesis nulas halladas con el uso de la herramienta *dffitool*. Adicionalmente, se selecciona la PDF que obtenga menor estadístico de prueba. Los resultados se presentan en el siguiente orden:

- Categoría de vídeo: categoría A (entrevista), categoría B y D (dibujos animados), categoría C (partido de fútbol) y Categoría E (película).
- Escenario de Experimentación: escenario 1 (1 UE se encuentra estático a una distancia de 30m del eNB), escenario 2, 3, 4 (1 UE se aleja del eNB con velocidades de 1, 2 y 3 mps, en una dirección $y=x$) y escenario 5 (UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria).
- Tipo de *Slice*: I, P, B o Audio
- Tamaño de *slice* y el tiempo relativo de llegada de *slice*.

Para que la hipótesis nula sea válida, el estadístico de prueba D debe ser menor que el valor crítico definido, el cual corresponde con el valor de contraste, en este caso $D_{0.05}$. Se selecciona y resalta la PDF que cumpla con la hipótesis nula, en caso que existan varias PDF cumplan la hipótesis nula, se selecciona la que posea el estadístico de prueba menor con respecto al valor crítico. Por último, se definen los parámetros de la PDF que cumple la prueba de K-V, los cuales se encuentran resumidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la sección 4.3 y que sigue la nomenclatura definida en la tabla Tabla D.1.

D.3.2.1 Categoría A (entrevista)

- *Escenario 1*: 1 UE se encuentra estático a una distancia de 30m del eNB

Para el tipo de video de entrevista (Categoría A) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo ITamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnov

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1708	0.2647	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1708	0.2806	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1708	0.1697	Hipótesis Aprobada
Logistic	0.1708	0.1704	Hipótesis Aprobada
Lognormal	0.1708	0.2227	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1708	0.2250	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1708	0.22430	Hipótesis Rechazada
t Location-Scale	0.1708	0.1789	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1708	0.2802	Hipótesis Rechazada

Distribution: Log-Logistic

Log likelihood: -151.551

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 748.001

Variance: 20.0191

Parameter Estimate Std. Err.

mu 6.61739 0.000776521

sigma 0.00329778 0.000430518

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnov

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0762	0.1095	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0762	0.1003	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0762	0.0864	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0762	0.0760	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0762	0.0770	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0762	0.0772	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0762	0.0301	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0762	0.0772	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0762	0.0866	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Normal**

Log likelihood: -223.275

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 3.04151

Variance: 0.33634

Parameter Estimate Std. Err.

mu 3.04151 0.0362468
 sigma 0.579948 0.0257058

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0684	0.0783	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0684	0.0694	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0684	0.0780	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme V	0.0684	0.0784	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0684	0.0783	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0684	0.0726	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0684	0.0683	Hipótesis Aprobada
Lognormal	0.0684	0.0784	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0684	0.0766	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0684	0.0780	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0684	0.0743	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0684	0.0723	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0684	0.0682	Hipótesis Aprobada

Distribution: Weibull

Log likelihood: -3781.11

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 160602

Variance: 1.32652e+09

Parameter Estimate Std. Err.

A 174806 2053.31

B 5.05487 0.21802

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1286	0.1204	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1286	0.2667	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1286	0.1429	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1286	0.1617	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1286	0.2778	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1286	0.1631	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1286	0.2778	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1286	0.1630	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1286	0.1778	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -36.8364

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 0.387481
 Variance: 0.175203
 Parameter Estimate Std. Err.
 mu 0.575861 0.0365204
 sigma 0.32636 0.0260304

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0734	0.1250	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0734	0.0738	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0734	0.1076	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme Value	0.0734	0.1916	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0734	0.0958	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0734	0.0733	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.0734	0.1112	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0734	0.1029	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -3095.67
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 81669.5
 Variance: 3.78812e+08

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 81669.5 1195.81
 sigma 10730.6 501.744

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0237	0.0409	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0237	0.0471	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0237	0.0403	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0237	0.0226	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0237	0.0350	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0237	0.0437	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0237	0.2119	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0237	0.1092	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0237	0.0592	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Normal**

Log likelihood: 24846.8
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 4.98928e-05

Variance: 4.17436e-10

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 4.98928e-05 3.96967e-07
 sigma 2.04313e-05 2.80777e-07

- *Escenario 2* : 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 1 mps

Para el tipo de video de entrevista (Categoría A) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1725	0.2204	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1725	0.2740	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1725	0.2740	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1725	0.1723	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.1725	0.2183	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1725	0.2187	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1725	0.2208	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1725	0.2736	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic
 Log likelihood: -149.025
 Domain: -Inf < y < Inf
 Mean: 747.977
 Variance: 20.4747

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 747.977 0.595603
 sigma 2.49471 0.328379

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0784	0.1373	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0784	0.1373	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0784	0.0804	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0784	0.0718	Hipótesis Aceptada

Rician	0.0784	0.0722	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0784	0.0723	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0784	0.0797	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0784	0.0722	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0784	0.1051	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: -208.367

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 3.02754

Variance: 0.328997

Parameter Estimate Std. Err.

mu 3.02754 0.0368713

sigma 0.573583 0.0261531

Slices tipo PTamaño de *Slice***Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof**

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0775	0.0805	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0775	0.0783	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0775	0.0783	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0775	0.0831	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme V	0.0775	0.0891	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0775	0.0804	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0775	0.0788	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0775	0.0774	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.0775	0.0847	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0775	0.0785	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -2958.97

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 156675

Variance: 1.51248e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 156675 2451.93

sigma 21441.5 1088.8

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0784	0.1082	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0784	0.0812	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0784	0.0756	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0784	0.0786	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0784	0.1588	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0784	0.0796	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0784	0.1588	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0784	0.0796	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0784	0.1588	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -30.8751

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.463678

Variance: 0.133068

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.463678 0.0387397

sigma 0.201116 0.0175259

Slices tipo AudioTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0256	0.02843	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0256	0.02544	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0256	0.02653	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0256	0.02681	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0256	0.02682	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0256	0.02779	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0256	0.05026	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0256	0.02974	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0256	0.02974	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Generalized Extreme Value**

Log likelihood: -16637.6

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1590.63

Variance: 34490.1

Parameter Estimate Std. Err.

k -0.394584 0.0107032

sigma 195.314 2.95025

mu 1534.98 4.20788

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0256	0.02521	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0256	0.02497	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0256	0.02441	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0256	0.02637	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0256	0.02644	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0256	0.02242	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0256	0.03283	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0256	0.02617	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0256	0.02628	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: 21481.6

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 5.37621e-05

Variance: 3.62231e-10

Parameter Estimate Std. Err.

mu 5.37621e-05

sigma 1.04931e-05

- *Escenario 3*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 2 mps

Para el tipo de video de entrevista (Categoría A) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Normal	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Rician	0.2601	0.2273	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.2601	0.2272	Hipótesis Aceptada

Distribution: Weibull

Log likelihood: -28.9297

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 749.275

Variance: 0.566043

Parameter Estimate Std. Err.

A 749.614 0.118968

B 1276.56 204.273

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0784	0.1373	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0784	0.1121	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0784	0.0804	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0784	0.0723	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0784	0.0718	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0784	0.0722	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0784	0.3897	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0784	0.0722	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0784	0.1051	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Rician**

Log likelihood: -208.353

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.02755

Variance: 0.327632

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.97072 0.0379192

sigma 0.578128 0.0268302

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0666	0.0856	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0666	0.0967	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0666	0.0661	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.0666	0.0930	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0666	0.0953	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0666	0.0855	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0666	0.1017	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0666	0.0990	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0666	0.0871	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0666	0.0966	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0666	0.0930	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0666	0.0999	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0666	0.0962	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0666	0.0884	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -4057.18

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 155922

Variance: 2.48884e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 178374 2252.97

sigma 38897.7 1532.81

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1316	0.1308	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1316	0.1668	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1316	0.1370	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1316	0.1367	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1316	0.2088	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1316	0.1376	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1316	0.2088	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1316	0.1376	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1316	0.2088	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -31.5643
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 0.455139
 Variance: 0.158222

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 0.634157 0.0354517
 sigma 0.310141 0.0254476

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0236	0.02994	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0236	0.02730	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0236	0.02686	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0236	0.02660	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0236	0.02357	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0236	0.03701	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0236	0.05180	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0236	0.02753	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0236	0.02388	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -17619.5
 Domain: $0 < y < \text{Inf}$
 Mean: 1595.17
 Variance: 30950.9

Parameter Estimate Std. Err.
 s 1585.31 3.43452
 sigma 176.483 2.42867

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0247	0.03104	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0247	0.03451	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0247	0.03042	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0247	0.03628	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0247	0.02704	Hipótesis Rechazada

Stable	0.0247	0.02395	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0247	0.03318	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0247	0.02868	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0247	0.02961	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Stable**

Log likelihood: 23005

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.50912e-05

Variance: NaN

Parameter Estimate Std. Err.

alpha 1.21001 0.0386144

beta -0.460126 0.0413015

gam 8.67883e-06 9.31662e-07

delta 5.67542e-05 2.46579e-07

- *Escenario 4*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 3 mps

Para el tipo de video de entrevista (Categoría A) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Normal	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Rician	0.2401	0.2373	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.2401	0.2370	Hipótesis Aceptada

Distribution: **Weibull**

Log likelihood: -41.0881

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 749.127

Variance: 0.764109

Parameter Estimate Std. Err.

A 749.52 0.123455

B 1098.41 154.833

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0754	0.1435	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0754	0.1290	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0754	0.0960	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0754	0.0798	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0754	0.0750	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0754	0.0798	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0754	0.3492	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0754	0.0799	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0754	0.1063	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -209.969

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.10393

Variance: 0.290754

Parameter Estimate Std. Err.

s 3.05515 0.0341534

sigma 0.543689 0.0241609

Slices tipo P

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0639	0.0816	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0639	0.0675	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0639	0.0784	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0639	0.0842	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0639	0.0816	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0639	0.0736	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0639	0.0634	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.0639	0.0813	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0639	0.0748	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0639	0.0784	Hipótesis Rechazada

Normal	0.0639	0.0780	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0639	0.0723	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0639	0.0801	Hipótesis Rechazada
Distribution: Logistic			
Log likelihood: -4315			
Domain:	-Inf < y < Inf		
Mean:	150553		
Variance:	1.27483e+09		
Parameter Estimate Std. Err.			
mu	150553	1841.86	
sigma	19685.1	834.518	

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1163	0.1152	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1163	0.1158	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.1163	0.1268	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1163	0.1461	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1163	0.2400	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1163	0.1422	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1163	0.2400	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1163	0.1422	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1163	0.4000	Hipótesis Rechazada
Distribution: Extreme Value			
Log likelihood: -48.8459			
Domain:	-Inf < y < Inf		
Mean:	0.454821		
Variance:	0.181684		
Parameter Estimate Std. Err.			
mu	0.646653	0.0335824	
sigma	0.332341	0.0244771	

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0240	0.03188	Hipótesis Rechazada

Generalized Extreme	0.0240	0.02566	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0240	0.02564	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0240	0.02563	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0240	0.02338	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0240	0.03145	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0240	0.04242	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0240	0.03169	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0240	0.03178	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -16869.9

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 1595.7

Variance: 28847.5

Parameter Estimate Std. Err.

s 1586.53 3.37729

sigma 170.343 2.38823

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0252	0.03459	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0252	0.03400	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0252	0.02264	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0252	0.03143	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0252	0.03121	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0252	0.03139	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0252	0.03206	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0252	0.03172	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0252	0.03147	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: 22066.3

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 5.36445e-05

Variance: 4.01207e-10

Parameter Estimate Std. Err.

mu 5.36445e-05

sigma 1.10432e-05

- *Escenario 5*: UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria

Para el tipo de video de entrevista (Categoría A) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Weibull	0.1929	0.1928	Hipótesis Aceptada
Birnbaum-Saunders	0.1929	0.1929	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.1929	0.1929	Hipótesis Aceptada
Rician	0.1929	0.1929	Hipótesis Aceptada
Distribution: Weibull			
Log likelihood: -46.061			
Domain: $0 < y < \text{Inf}$			
Mean: 749.279			
Variance: 0.63991			
Parameter Estimate Std. Err.			
A	749.638	0.103699	
B	1200.59	161.851	

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0765	0.1151	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0765	0.1231	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0765	0.0781	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0765	0.0768	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0765	0.0751	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0765	0.0764	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0765	0.3574	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0765	0.0764	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0765	0.0888	Hipótesis Rechazada
Distribution: Rician			
Log likelihood: -229.512			
Domain: $0 < y < \text{Inf}$			

Mean: 3.07417
 Variance: 0.356794

Parameter Estimate Std. Err.
 s 3.01304 0.0386993
 sigma 0.603692 0.0273847

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0651	0.0918	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0651	0.0964	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0651	0.0650	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.0651	0.0961	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0651	0.0936	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0651	0.0917	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0651	0.0971	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0651	0.0910	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0651	0.0924	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0651	0.0980	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0651	0.0961	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0651	0.0985	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0651	0.0981	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0651	0.0906	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value
 Log likelihood: -4261.77
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 153439
 Variance: 2.93371e+09

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 177815 2396.69
 sigma 42231.3 1599.33

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1308	0.1294	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1308	0.1868	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1308	0.1341	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1308	0.1608	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1308	0.2683	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1308	0.1621	Hipótesis Rechazada

Exponencial	0.1308	0.2683	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1308	0.1521	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1308	0.2683	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -31.2632

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.396388

Variance: 0.154663

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.573382 0.0348617

sigma 0.306633 0.0253014

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0235	0.02856	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0235	0.02658	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0235	0.02798	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0235	0.02592	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0235	0.02345	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0235	0.02570	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0235	0.02972	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0235	0.03155	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0235	0.03179	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -17691.3

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 1598.9

Variance: 30485.5

Parameter Estimate Std. Err.

s 1589.22 3.39906

sigma 175.14 2.40362

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado

Extreme Value	0.0248	0.03138	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0248	0.03134	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0248	0.03119	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0248	0.02609	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0248	0.02408	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0248	0.02838	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0248	0.03127	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0248	0.02879	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0248	0.02756	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: 22669.4

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 5.17474e-05

Variance: 4.13462e-10

Parameter Estimate Std. Err.

s 4.60229e-05 4.40358e-07

sigma 2.20583e-05 1.31536e-06

D.3.2.2 Categoría B y D (dibujos animados)

- *Escenario 1* : UE se encuentra estático a una distancia de 30m del eNB

Para el tipo de video dibujos animados (Categoría B y D) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Burr	0.1761	0.3548	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1761	0.4527	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1761	0.7586	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1761	0.8584	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1761	0.2587	Hipótesis Rechazada
t Location Scale	0.1761	0.1754	Hipótesis Aceptada

Distribution: t Location-Scale

Log likelihood: -551.019

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 289580

Variance: 3.97906e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 289580 2605.79

sigma 14004.1 2750.68

nu 2.10368 0.781613

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0755	0.1010	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0755	0.1040	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0755	0.0940	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0755	0.0751	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0755	0.0748	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0755	0.0863	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0755	0.1467	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0755	0.0963	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0755	0.126	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -233.362

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.04195

Variance: 0.350152

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.98132 0.037823

sigma 0.598063 0.0267644

Slices tipo P

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0724	0.0952	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0724	0.0841	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0724	0.0915	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0724	0.0789	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0724	0.0793	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0724	0.0715	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.0793	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0724	0.0793	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: -3434.9

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 180567

Variance: 1.88097e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 180567 2573.54

sigma 43370.1 1824.6

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1245	0.1223	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1245	0.1663	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1245	0.1252	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1245	0.1397	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1245	0.2375	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1245	0.1409	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.1245	0.2375	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1245	0.1409	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1245	0.2375	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -36.1998

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.416605

Variance: 0.161751

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.597608 0.0339534

sigma 0.313581 0.0244746

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0227	0.02259	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0227	0.04840	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0227	0.04729	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0227	0.04742	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0227	0.04743	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0227	0.07166	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0227	0.05238	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0227	0.05076	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0227	0.04180	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -18647.6
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 1576.22
 Variance: 36628.8

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 1662.36 2.96299
 sigma 149.224 1.93459

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0230	0.02360	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0230	0.02245	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0230	0.01612	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0230	0.01598	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0230	0.03598	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0230	0.02293	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0230	0.02888	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0230	0.02369	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0230	0.02620	Hipótesis Rechazada

Distribution: Generalized Extreme Value

Log likelihood: 25746
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 5.23111e-05
 Variance: 7.38078e-10

Parameter Estimate Std. Err.
 k -0.0874135 0.00790272
 sigma 2.3439e-05 3.22245e-07
 mu 4.06598e-05 4.79044e-07

- *Escenario 2* : 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 1 mps

Para el tipo de video dibujos animados (Categoría B y D) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Generalized Extreme	0.1725	0.2775	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1725	0.2784	Hipótesis Rechazada
Birnbaum-Saunders	0.1725	0.1565	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1725	0.1418	Hipótesis Aceptada
Log Logistic	0.1725	0.1858	Hipótesis Rechazada
LogNormal	0.1725	0.1493	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.1725	0.1345	Hipótesis Aceptada

Distribution: Nakagami

Log likelihood: -594.175

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 304690

Variance: 1.23141e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 18.9699 3.7611

omega 9.40673e+10 3.05436e+09

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0760	0.1803	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0760	0.0992	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0760	0.07566	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0760	0.07572	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0760	0.0967	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0760	0.0815	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0760	0.1951	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0760	0.1540	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0760	0.1179	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -253.634

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 2.94899

Variance: 0.468764

Parameter Estimate Std. Err.

mu 2.94899 0.0422308

sigma 0.377475 0.0188465

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0729	0.0752	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0729	0.0843	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0729	0.0929	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0729	0.0829	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0729	0.0573	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0729	0.0674	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0729	0.0704	Hipótesis Aceptada

Distribution: Rician

Log likelihood: -3349.58

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 184207

Variance: 1.43683e+09

Parameter Estimate Std. Err.

s 180069 2349.66

sigma 38366.8 1663.31

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1220	0.1216	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1220	0.1574	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1220	0.1314	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1220	0.1450	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1220	0.2300	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1220	0.1461	Hipótesis REchazada
Exponencial	0.1220	0.2300	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1220	0.1461	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1220	0.2300	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -30.3731

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.411518

Variance: 0.140241

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 0.580057 0.0309722
 sigma 0.291987 0.022205

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0225	0.02079	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0225	0.02101	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0225	0.01717	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0225	0.02089	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0225	0.02089	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0225	0.02310	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0225	0.05245	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0225	0.02421	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0225	0.02052	Hipótesis Aceptada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -18961.4

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1573.24

Variance: 22964.8

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 1573.24 2.58322
 sigma 83.5492 1.35718

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0225	0.01637	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0225	0.01482	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0225	0.01385	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0225	0.01226	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0225	0.01199	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0225	0.01698	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0225	0.03027	Hipótesis Rechazada

T Location-Scale	0.0225	0.02064	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0225	0.01215	Hipótesis Aceptada

Distribution: Rician

Log likelihood: 25716.7

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 4.99212e-05

Variance: 3.53455e-10

Parameter Estimate Std. Err.

s 4.50961e-05 3.80126e-07

sigma 2.01485e-05 1.19933e-06

- *Escenario 3*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 2 mps

Para el tipo de video dibujos animados (Categoría B y D) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Gamma	0.1537	0.1777	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1537	0.2797	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.1537	0.1535	Hipótesis Aceptada
Log- Logistic	0.1537	0.2193	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1537	0.2771	Hipótesis Rechazada
Birnbaum-Saunders	0.1537	0.1836	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1537	0.2068	Hipótesis Rechazada

Distribution: Inverse Gaussian

Log likelihood: -737.939

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 302550

Variance: 8.87168e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 302550 3752.6

lambda 3.12167e+07 5.56201e+06

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
---	--	--	--

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0806	0.1136	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0806	0.1113	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0806	0.0967	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0806	0.0802	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0806	0.0840	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0806	0.0841	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0806	0.0841	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0806	0.0841	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0806	0.0965	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: -185.848

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 3.06832

Variance: 0.298084

Parameter Estimate Std. Err.

mu 3.06832 0.0360787

sigma 0.54597 0.0255955

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0747	0.1433	Hipótesis Rechazada
Burr	0.0747	0.1667	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0747	0.1566	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0747	0.1808	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0747	0.0731	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.0747	0.1778	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0747	0.1454	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0747	0.1653	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0747	0.1566	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0747	0.1750	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0747	0.1797	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0747	0.1815	Hipótesis Rechazada

Distribution: Inverse Gaussian

Log likelihood: -3142.92

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 189547

Variance: 1.80993e+09

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 189547 2633.36
 lambda 3.76263e+06 329372

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1245	0.1223	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1245	0.2168	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1245	0.1379	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1245	0.1584	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1245	0.2704	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1245	0.1596	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1245	0.1704	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1245	0.1596	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1245	0.2704	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: -40.675
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 0.410166
 Variance: 0.176165

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 0.599063 0.0354386
 sigma 0.327254 0.025791

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0243	0.02589	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0243	0.02568	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0243	0.02314	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0243	0.02528	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0243	0.02628	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0243	0.04421	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0243	0.05275	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0243	0.04762	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0243	0.02351	Hipótesis Aceptada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -17201.5
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 1569.12
 Variance: 20301

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 1569.12 2.54637
 sigma 78.5542 1.32749

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0243	0.03018	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0243	0.03274	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0243	0.00917	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0243	0.03129	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0243	0.03554	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0243	0.01650	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0243	0.03554	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0243	0.01938	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0243	0.02118	Hipótesis Aceptada

Distribution: Stable

Log likelihood: 23242.7
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 3.45424e-05
 Variance: NaN

Parameter Estimate Std. Err.
 alpha 1.14607 0.03818
 beta -0.452062 0.040251
 gam 9.96966e-06 1.16036e-06
 delta 5.38393e-05 3.12192e-07

- *Escenario 4*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 3 mps

Para el tipo de video dibujos animados (Categoría B y D) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1979	0.2883	Hipótesis Rechazada
Burr	0.1979	0.2917	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.1979	0.2884	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1979	0.2863	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1979	0.2886	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1979	0.2865	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1979	0.2851	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1979	0.1978	Hipótesis Aceptada
Negative Binomial	0.1979	0.2884	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1979	0.2853	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1979	0.2885	Hipótesis Rechazada

Distribution: Nakagami
 Log likelihood: -411.223
 Domain: $0 < y < \text{Inf}$
 Mean: 283377
 Variance: 1.46974e+08

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 136.718 31.3271
 omega 8.04495e+10 1.11614e+09

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0765	0.1282	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0765	0.1053	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0765	0.0818	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0765	0.0762	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0765	0.0764	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0765	0.0767	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0765	0.2217	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0765	0.0767	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0765	0.0947	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal
 Log likelihood: -222.748
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 3.01676
 Variance: 0.339588

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 3.01676 0.0365645
 sigma 0.582742 0.0259317

Slices tipo PTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0749	0.0924	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0749	0.0746	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.0749	0.1081	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0749	0.1045	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0749	0.0928	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0749	0.0877	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0749	0.0907	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0749	0.0885	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0749	0.0889	Hipótesis Rechazada
t Location-Scale	0.0749	0.0890	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0749	0.0907	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -3178.73

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 188335

Variance: 1.93077e+09

Parameter Estimate Std. Err.

mu 208111 2224.74

sigma 34260.3 1615.2

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1323	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1331	0.1806	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1550	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1331	0.1707	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1331	0.2686	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1331	0.1720	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1331	0.2686	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1720	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1331	0.2686	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -27.101

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.401307

Variance: 0.14331

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.57168 0.0341453

sigma 0.295165 0.0248193

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0228	0.02291	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0228	0.02948	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0228	0.02822	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0228	0.02804	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0228	0.02804	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0228	0.02746	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0228	0.05105	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0228	0.02730	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0228	0.02136	Hipótesis Aceptada

Distribution: Weibull

Log likelihood: -18611.7

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 1563.8

Variance: 32588.1

Parameter Estimate Std. Err.

A 1640.76 3.11341

B 10.4471 0.141862

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0237	0.03171	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0237	0.02392	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0237	0.02380	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0237	0.02578	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0237	0.02476	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0237	0.02454	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0237	0.02721	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0237	0.02561	Hipótesis Rechazada

Weibull	0.0237	0.02337	Hipótesis Aceptada
Distribution: Weibull			
Log likelihood: 24547.7			
Domain: $0 < y < \text{Inf}$			
Mean: 5.13587e-05			
Variance: 5.99863e-10			
Parameter Estimate Std. Err.			
A	5.79899e-05	5.31151e-07	
B	2.21516	0.0326347	

- *Escenario 5*: UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria

Para el tipo de video dibujos animados (Categoría B y D) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1725	0.2759	Hipótesis Rechazada
Burr	0.1725	0.2752	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1725	0.1715	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1725	0.2764	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme V	0.1725	0.2740	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1725	0.2755	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1725	0.2746	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1725	0.2736	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1725	0.2768	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1725	0.2749	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1725	0.2772	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1725	0.2626	Hipótesis Rechazada
Distribution: Extreme Value			
Log likelihood: -545.561			
Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$			
Mean: 282186			
Variance: 2.33368e+08			
Parameter Estimate Std. Err.			
mu	289061	1786.98	
sigma	11910.9	1258.6	

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1748	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1331	0.1508	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1365	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1331	0.1332	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1331	0.1329	Hipótesis Aceptada
Stable	0.1331	0.1335	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1331	0.4331	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1335	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1331	0.1552	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -203.415

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 2.98358

Variance: 0.330816

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.92523 0.0387189

sigma 0.581191 0.0273973

Slices tipo PTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0724	0.0927	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0724	0.0803	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0724	0.0910	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme V	0.0724	0.0718	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0724	0.1005	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0724	0.1049	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0724	0.0931	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0724	0.0879	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0724	0.0846	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0724	0.0849	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.0861	Hipótesis Rechazada

Distribution: Generalized Extreme Value

Log likelihood: -3398.3

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 189992

Variance: 1.54891e+09

Parameter Estimate Std. Err.
 k -0.466414 0.0431367
 sigma 42209.4 2098.51
 mu 179640 2758.84

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1351	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1331	0.2576	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1330	Hipótesis Aceptada
Normal	0.1331	0.1508	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1331	0.1519	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1331	0.1519	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1331	0.2595	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1519	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1331	0.2519	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -44.0417

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.418901

Variance: 0.154453

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 0.418901 0.0384757
 sigma 0.216675 0.0170955

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0244	0.02529	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0244	0.02539	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0244	0.01689	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0244	0.02717	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0244	0.02717	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0244	0.01751	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0244	0.05271	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0244	0.02504	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0244	0.01998	Hipótesis Aceptada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -16160.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 1574.92
 Variance: 22448.3

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 1574.92 2.77715
 sigma 82.6043 1.44337

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0256	0.03501	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0256	0.03810	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0256	0.02406	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0256	0.03157	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0256	0.02657	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0256	0.02645	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0256	0.03270	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0256	0.02675	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0256	0.02866	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: 21317.3
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 5.27064e-05
 Variance: 3.93374e-10

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 5.27064e-05 NaN
 sigma 1.09349e-05 NaN

D.3.2.3 Categoría C (Deportes - partido de fútbol)

- *Escenario 1* : 1 UE se encuentra estático a una distancia de 30m del eNB

Para el tipo de video partido de futbol ó deportes (Categoría C) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado

Birnbaum-Saunders	0.1364	0.2382	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1364	0.1355	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1364	0.2335	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1364	0.2814	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.1364	0.2382	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1364	0.2250	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1364	0.2118	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1364	0.2370	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1364	0.2187	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.1364	0.2335	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1364	0.2122	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1364	0.2129	Hipótesis Rechazada
t Location-Scale	0.1364	0.2130	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1364	0.2028	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: -899.357

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 154801

Variance: 5.02126e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 164886 2079.6

sigma 17471.6 1355.42

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1763	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1331	0.1628	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1421	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1331	0.1337	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1331	0.1330	Hipótesis Aceptada
Stable	0.1331	0.1340	Hipótesis Rechazada
exponencial	0.1331	0.4132	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1340	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1331	0.1474	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Rician**

Log likelihood: -179.852

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.00741

Variance: 0.330124

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.94971 0.041086

sigma 0.58046 0.0290717

Slice tipo PTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0885	0.0980	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0885	0.0893	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0885	0.0946	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0885	0.0926	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0885	0.0980	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0885	0.1126	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0885	0.0983	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0885	0.0990	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0885	0.0913	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0885	0.0946	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0885	0.0891	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0885	0.0886	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0885	0.0884	Hipótesis Aceptada

Distribution: Weibull

Log likelihood: -2133.2

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 102377

Variance: 3.34728e+08

Parameter Estimate Std. Err.

A 109828 1281.68

B 6.54957 0.384524

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1309	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1331	0.3162	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1388	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1331	0.1646	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1331	0.3190	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1331	0.2964	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1331	0.2669	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1567	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1331	0.3090	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -29.9338

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.360263

Variance: 0.217328

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.570071 0.0507082

sigma 0.363482 0.0362998

Estimated covariance of parameter estimates:

	mu	sigma
mu	0.00257132	-0.000621779
sigma	-0.000621779	0.00131767

Slice tipo AudioTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0182	0.02476	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0182	0.02880	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0182	0.02664	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0182	0.02919	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0182	0.02517	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0182	0.01817	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0182	0.03868	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0182	0.02151	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0182	0.02354	Hipótesis Rechazada

Distribution: Stable

Log likelihood: -32422.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.5985e-05

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

alpha 0.660443 0.0351319

beta 0.367676 0.0368466

gam 64.5148 8.63497e-03

delta 1547.7 2.16203e-03

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0216	0.03007	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0216	0.02207	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0216	0.02106	Hipótesis Aceptada

Normal	0.0216	0.02371	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0216	0.02240	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0216	0.02354	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0216	0.02358	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: 29497.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 5.29828e-05

Variance: 5.08603e-10

Parameter Estimate Std. Err.

mu 5.29828e-05

sigma 1.24337e-05

- *Escenario 2*: UE se aleja del eNB con velocidades de 1 mps

Para el tipo de video partido de futbol ó deportes (Categoría C) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Exponential	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1252	0.1251	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Generalized Pareto	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Half Normal	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1252	0.3263	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1252	0.1339	Hipótesis Rechazada
Rayleigh	0.1252	0.3063	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1252	0.3063	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: -1201.31

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 63402.9

Variance: 7.05945e+09

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 101217 7125.99
 sigma 65510.5 5324.88

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1331	0.1632	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1331	0.1504	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1331	0.1348	Hipótesis Aceptada
Normal	0.1331	0.1311	Hipótesis Aceptada
Rician	0.1331	0.1313	Hipótesis Aceptada
Stable	0.1331	0.1315	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.1331	0.4220	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1331	0.1315	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.1331	0.1474	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: -230.698

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 3.03274

Variance: 0.314605

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 3.03274 0.0338233
 sigma 0.560896 0.0239822

Slices tipo P

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0775	0.0751	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.0775	0.1210	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0775	0.0788	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0775	0.0946	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0775	0.0790	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0775	0.0798	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0775	0.0818	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0775	0.0784	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0775	0.0799	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0775	0.0788	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0775	0.0837	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0775	0.0843	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0775	0.1033	Hipótesis Rechazada

Distribution: Birnbaum-Saunders

Log likelihood: -2772

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 100656

Variance: 3.13048e+08

Parameter Estimate Std. Err.

beta 99134.9 1098.34

gamma 0.175149 0.00786442

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0211	0.02061	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0211	0.03898	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0211	0.03076	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0211	0.03113	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0211	0.03898	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0211	0.03874	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0211	0.03898	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0211	0.02900	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0211	0.03898	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: 6127.32

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.000799605

Variance: 0.00303933

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.0256111 0.000789487

sigma 0.0429848 0.000397247

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0264	0.02619	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0264	0.02374	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0264	0.01801	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0264	0.02146	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0264	0.02145	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0264	0.01685	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0264	0.05364	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0264	0.01656	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0264	0.02498	Hipótesis Rechazada

Distribution: t Location-Scale

Log likelihood: -13458

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1548.31

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 1548.31 1.26364
 sigma 41.4081 1.14781
 nu 1.38915 0.0537523

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0264	0.03012	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0264	0.02918	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0264	0.02938	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0264	0.02882	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0264	0.03259	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0264	0.02635	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0264	0.03415	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0264	0.02972	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0264	0.03265	Hipótesis Rechazada

Distribution: Stable

Log likelihood: 20281

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.01072e-05

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.
 alpha 1.10562 0.0399943
 beta -0.374936 0.0405672
 gam 7.45368e-06 1.15719e-06
 delta 5.67975e-05 2.66957e-07

- Escenario 3: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 2 mps

Para el tipo de video partido de futbol ó deportes (Categoría C) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1409	0.1925	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1409	0.1405	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1409	0.1692	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1409	0.1645	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.1409	0.1625	Hipótesis Rechazada

Log-Logistic	0.1409	0.1470	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1409	0.1460	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1409	0.1616	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1409	0.1559	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.1409	0.1892	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1409	0.1512	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1409	0.1621	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1409	0.1505	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -828.28

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 149003

Variance: 3.10362e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 156931 1685.3

sigma 13736 1176.93

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0724	0.1220	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0724	0.0951	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0724	0.0726	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0724	0.0743	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0724	0.0718	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0724	0.0745	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0724	0.3380	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0724	0.0744	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.0973	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -256.774

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 2.94857

Variance: 0.357421

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.8844 0.0367511

sigma 0.604877 0.0260095

Slices tipo PTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0783	0.0814	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0783	0.0905	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0783	0.0830	Hipótesis Rechazada

Generalized Extreme	0.0783	0.0827	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0783	0.0814	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0783	0.0824	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0783	0.0786	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0783	0.0813	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0783	0.0839	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0783	0.0842	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0783	0.0846	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0783	0.0781	Hipótesis Aceptada

Distribution: Weibull

Log likelihood: -2705.94

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 95783.6

Variance: 2.92433e+08

Parameter Estimate Std. Err.

A 102749 1063.19

B 6.55645 0.330212

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1347	0.1340	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1347	0.2958	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1347	0.1361	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1347	0.1544	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1347	0.3034	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1347	0.2954	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1347	0.3034	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1347	0.1559	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1347	0.3034	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -27.3106

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.278463

Variance: 0.161543

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.45935 0.036829

sigma 0.313379 0.02487

Slice tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0243	0.03187	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0243	0.03213	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0243	0.02760	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0243	0.03127	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0243	0.03127	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0243	0.02538	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0243	0.05473	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0243	0.02436	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0243	0.03128	Hipótesis Rechazada

Distribution: **t Location-Scale**

Log likelihood: -14069.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1549.17

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1549.17 0.995486

sigma 34.561 0.788565

nu 1.7167 0.0646972

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0249	0.03528	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0249	0.03013	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0249	0.02658	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0249	0.02924	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0249	0.02437	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0249	0.03830	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0249	0.02567	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0249	0.02828	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Stable**

Log likelihood: 22421.8

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Parameter Estimate Std. Err.

alpha 0.917028 0.0327338

beta -0.198 0.0332421

gam 6.99932e-06 1.51834e-06

delta 5.45389e-05 3.16421e-07

- *Escenario 4*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 3 mps

Para el tipo de video partido de futbol ó deportes (Categoría C) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo ITamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Exponential	0.1153	0.3064	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.1153	0.3064	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1153	0.1150	Hipótesis Aceptada
Normal	0.1153	0.1355	Hipótesis Rechazada
Rayleigh	0.1153	0.3064	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1153	0.3064	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic
 Log likelihood: -1397.78
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 52398.5
 Variance: 4.48097e+09

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 52398.5 6260.39
 sigma 36906 2833.87

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0724	0.1220	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0724	0.0951	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0724	0.0721	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0724	0.0743	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0724	0.0738	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0724	0.0745	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0724	0.3380	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0724	0.0744	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.0973	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic
 Log likelihood: -270.666
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 2.94427
 Variance: 0.439889

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 2.94427 0.038925
 sigma 0.365664 0.0174354

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0742	0.0741	Hipótesis Aceptada
Burr	0.0742	0.1327	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0742	0.1581	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0742	0.0804	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0742	0.1054	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0742	0.0773	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0742	0.0817	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0742	0.0999	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0742	0.0776	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0742	0.0921	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0742	0.0804	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0742	0.1042	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0742	0.1038	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0742	0.1332	Hipótesis Rechazada

Distribution: Birnbaum-Saunders

Log likelihood: -3014.35

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 96482.3

Variance: 3.05765e+08

Parameter Estimate Std. Err.

beta 94934.9 1038.87

gamma 0.180549 0.00776959

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1502	0.1493	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1502	0.3839	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1502	0.1546	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1502	0.2022	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1502	0.3858	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1502	0.3828	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1502	0.3858	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1502	0.2041	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -29.8442

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.263743

Variance: 0.204857

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.467442 0.0462735

sigma 0.352899 0.0315

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0944	0.10044	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0944	0.09975	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0944	0.09523	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0944	0.09604	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0944	0.09603	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0944	0.09525	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0944	0.12406	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0944	0.09316	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0944	0.09917	Hipótesis Rechazada

Distribution: **t Location-Scale**

Log likelihood: -14815.2

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1553.72

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1553.72 0.990954

sigma 33.8986 0.836453

nu 1.48929 0.0542677

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0944	0.09331	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0944	0.14021	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0944	0.10755	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0944	0.11233	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0944	0.14036	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0944	0.14019	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0944	0.14021	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0944	0.10955	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0944	0.14021	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: 22190.1

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.53937e-05

Variance: 2.08998e-09

Parameter Estimate Std. Err.
 mu 6.59684e-05 7.58061e-07
 sigma 3.56448e-05 4.09363e-07

- Escenario 5: UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria

Para el tipo de video partido de futbol o deportes (Categoría C) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.1293	0.1487	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.1293	0.1290	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.1293	0.1461	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1293	0.1463	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.1293	0.1487	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.1293	0.1355	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1293	0.1310	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.1293	0.1481	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.1293	0.1434	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1293	0.1395	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1293	0.1401	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1293	0.1298	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -994.497

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 152623

Variance: 3.86532e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 161471 1722.76

sigma 15329.2 1235.22

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0724	0.1220	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0724	0.0951	Hipótesis Rechazada

Logistic	0.0724	0.0716	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0724	0.0743	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0724	0.0738	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0724	0.0745	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0724	0.3380	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0724	0.0744	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.0973	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -270.666

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 2.94427

Variance: 0.439889

Parameter Estimate Std. Err.

mu 2.94427 0.038925

sigma 0.365664 0.0174354

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0840	0.0835	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.0840	0.1119	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0840	0.0843	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0840	0.0898	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0840	0.0895	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0840	0.0888	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0840	0.0851	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0840	0.0873	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0840	0.0868	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0840	0.0843	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0840	0.0889	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0840	0.0893	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0840	0.0855	Hipótesis Rechazada

Distribution: Birnbaum-Saunders

Log likelihood: -2368.52

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 98846.2

Variance: 3.46644e+08

Parameter Estimate Std. Err.

beta 97137.1 1248.92

gamma 0.18759 0.00913173

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0724	0.0723	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0724	0.3039	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0724	0.0946	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0724	0.1222	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0724	0.3058	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0724	0.3029	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0724	0.3058	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0724	0.1241	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0724	0.3058	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -29.8442

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.263743

Variance: 0.204857

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.467442 0.0462735

sigma 0.352899 0.0315

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0249	0.03172	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0249	0.03014	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0249	0.02566	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0249	0.03082	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0249	0.03082	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0249	0.03636	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0249	0.05366	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0249	0.02326	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0249	0.02753	Hipótesis Rechazada

Distribution: t Location-Scale

Log likelihood: -14672.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1542.92

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1542.92 1.46471

sigma 44.6058 1.42552

nu 1.2018 0.0466684

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0213	0.02238	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0213	0.02303	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0213	0.02068	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0213	0.02320	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0213	0.02400	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0213	0.02234	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0213	0.03305	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0213	0.02589	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0213	0.02606	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: 20945.5

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 5.40897e-05

Variance: 3.88492e-10

Parameter Estimate Std. Err.

mu 5.40897e-05

sigma 1.08668e-05

D.3.2.4 Categoría E (película)

- Escenario 1: 1 UE se encuentra estático a una distancia de 30m del eNB

Para el tipo de video película (Categoría E) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo ITamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0631	0.0580	Hipótesis Aceptada
Burr	0.0631	0.0534	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.0631	0.0613	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.0631	0.0473	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme Value	0.0631	0.0541	Hipótesis Aceptada
Inverse Gaussian	0.0631	0.0582	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.0631	0.0463	Hipótesis Aceptada
Logistic	0.0631	0.0516	Hipótesis Aceptada

Lognormal	0.0631	0.0566	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.0631	0.0445	Hipótesis Aceptada
Negative Binomial	0.0631	0.0473	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0631	0.0436	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0631	0.0437	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0631	0.0542	Hipótesis Aceptada

Distribution: Normal

Log likelihood: -4193.41

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 94504.1

Variance: 3.2181e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 94504.1 927.608

sigma 17939.1 657.237

Estimated covariance of parameter estimates:

mu sigma

mu 860456 -6.34985e-10

sigma -6.34985e-10 431960

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0765	0.1151	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0765	0.1231	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0765	0.0781	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0765	0.0768	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0765	0.0750	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0765	0.0758	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0765	0.3574	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0765	0.0758	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0765	0.0888	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -229.512

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.07417

Variance: 0.356794

Parameter Estimate Std. Err.

s 3.01304 0.0386993

sigma 0.603692 0.0273847

Slices tipo P

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Generalized Extreme Value	0.2393	0.2392	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.2393	0.2438	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.2393	0.2488	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.2393	0.2446	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.2393	0.2432	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Generalized Extreme Value**

Log likelihood: -270.943

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 145800

Variance: Inf

Parameter Estimate Std. Err.

k 0.549922 0.218535

sigma 5068.72 1143.43

mu 136880 1158.36

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1308	0.1304	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1308	0.1968	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1308	0.1541	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1308	0.1708	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1308	0.2783	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1308	0.1721	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1308	0.2783	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1308	0.1721	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1308	0.2783	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: -31.2632

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.396388

Variance: 0.154663

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.573382 0.0348617

sigma 0.306633 0.0253014

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0215	0.02285	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0215	0.02683	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0215	0.02146	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0215	0.02723	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0215	0.02824	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0215	0.03522	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0215	0.05297	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0215	0.02153	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0215	0.02958	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Logistic**

Log likelihood: -20943.3

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1580.03

Variance: 24215.8

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1580.03 2.55366

sigma 85.7946 1.31652

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0225	0.03595	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0225	0.02331	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0225	0.02313	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0225	0.02490	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0225	0.02560	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0225	0.02188	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0225	0.02348	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0225	0.02441	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0225	0.02774	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Stable**

Log likelihood: 27828.9

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.5985e-05

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

alpha 1.18627 0.0351319

beta -0.422653 0.0368466

gam 8.01472e-06 8.63497e-07

delta 5.72301e-05 2.16203e-07

- Escenario 2: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 1 mps

Para el tipo de video película (Categoría E) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0732	0.0770	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0732	0.0837	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0732	0.0687	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0732	0.0694	Hipótesis Aceptada
Inverse Gaussian	0.0732	0.0772	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0732	0.0753	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0732	0.0707	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.0732	0.0755	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0732	0.0612	Hipótesis Aceptada

Distribution: Nakagami

Log likelihood: -3117.1

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 99585

Variance: 3.23092e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 7.79266 0.64731

omega 1.02403 2.20012e+08

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1308	0.1651	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.1308	0.1731	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1308	0.1281	Hipótesis Aceptada
Normal	0.1308	0.1218	Hipótesis Aceptada
Rician	0.1308	0.1210	Hipótesis Aceptada
Stable	0.1308	0.1214	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.1308	0.4074	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1308	0.1214	Hipótesis Aceptada

Weibull	0.1308	0.1388	Hipótesis Rechazada
----------------	--------	--------	---------------------

Distribution: **Rician**

Log likelihood: -229.512

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.07417

Variance: 0.356794

Parameter Estimate Std. Err.

s 3.01304 0.0386993

sigma 0.603692 0.0273847

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2191	0.2216	Hipótesis Rechazada
Burr	0.2191	0.2382	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.2191	0.2185	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.2191	0.2344	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.2191	0.2350	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.2191	0.2260	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.2191	0.2238	Hipótesis Rechazada
Rician	0.2191	0.2281	Hipótesis Rechazada
Stable	0.2191	0.3382	Hipótesis Rechazada

Distribution: Generalized Extreme Value

Log likelihood: -315.492

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 146955

Variance: 4.12222e+07

Parameter Estimate Std. Err.

k -0.226822 0.101559

sigma 6219.98 822.257

mu 144528 1221.68

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1525	0.1521	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1525	0.4233	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1525	0.2048	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1525	0.2306	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1525	0.4237	Hipótesis Rechazada

Stable	0.1525	0.4228	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1525	0.4237	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1525	0.1616	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1525	0.4237	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -29.928

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.243636

Variance: 0.217205

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.453385 0.048413

sigma 0.363379 0.0322106

Slices tipo AudioTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0242	0.02774	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0242	0.02661	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0242	0.02390	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0242	0.02662	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0242	0.02662	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0242	0.03767	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0242	0.05201	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0242	0.02419	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0242	0.02632	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -16630.4

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1583.14

Variance: 28073.3

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1583.14 3.1046

sigma 92.3756 1.59396

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0250	0.02656	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0250	0.02735	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0250	0.02412	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0250	0.02898	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0250	0.02972	Hipótesis Rechazada

Stable	0.0250	0.02487	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0250	0.03358	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0250	0.02819	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0250	0.03140	Hipótesis Rechazada
Distribution: Logistic			
Log likelihood: 22482			
Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$			
Mean: 5.43433e-05			
Variance: 3.71914e-10			
Parameter Estimate Std. Err.			
mu 5.43433e-05			
sigma 1.06324e-05			

- *Escenario 3*: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 2 mps

Para el tipo de video película (Categoría E) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0740	0.0947	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0740	0.0322	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.0740	0.0738	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0740	0.0209	Hipótesis Aceptada
Inverse Gaussian	0.0740	0.0950	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0740	0.0903	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0740	0.0572	Hipótesis Aceptada
Lognormal	0.0740	0.0905	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0740	0.0652	Hipótesis Aceptada
Negative Binomial	0.0740	0.0739	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0740	0.0509	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0740	0.0516	Hipótesis Aceptada
t Location-Scale	0.0740	0.0491	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0740	0.0351	Hipótesis Aceptada

Distribution: Generalized Extreme Value

Log likelihood: -3062.04
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 96335.5

Variance: 4.1841e+08

Parameter Estimate Std. Err.
 k -0.582838 0.042512
 sigma 22267.5 1175.01
 mu 92197.7 1465.39

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0721	0.0943	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0721	0.0793	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0721	0.0793	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0721	0.0793	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0721	0.0718	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0721	0.0734	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0721	0.3405	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0721	0.3405	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0721	0.0775	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -259.298

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 2.97464

Variance: 0.359214

Parameter Estimate Std. Err.

s 2.91076 0.0366954

sigma 0.606291 0.0259694

Slices tipo P

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2092	0.2141	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.2092	0.2057	Hipótesis Aceptada
Gamma	0.2092	0.2140	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.2092	0.2129	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.2092	0.2121	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.2092	0.2141	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.2092	0.2140	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.2092	0.2140	Hipótesis Rechazada

Normal	0.2092	0.2139	Hipótesis Rechazada
Rician	0.2092	0.2140	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.2092	0.2086	Hipótesis Aceptada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -349.151
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 150324
 Variance: 5.99872e+07

Parameter Estimate Std. Err.

mu 153810 1094.62
 sigma 6038.86 811.355

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1525	0.1521	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1525	0.3033	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1525	0.1748	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1525	0.2106	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1525	0.3037	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1525	0.3028	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1525	0.3028	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1525	0.1536	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1525	0.3037	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -29.928
 Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$
 Mean: 0.243636
 Variance: 0.217205

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.453385 0.048413
 sigma 0.363379 0.0322106

Slices tipo AudioTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0250	0.2038	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0250	0.2034	Hipótesis Rechazada

Logistic	0.0250	0.1735	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0250	0.2033	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0250	0.2034	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0250	0.3624	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0250	0.5232	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0250	0.1561	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0250	0.1997	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -15575.6

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1581.57

Variance: 27731.3

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1581.57 3.17748

sigma 91.8112 1.64266

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0262	0.02952	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0262	0.02958	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0262	0.02820	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0262	0.02712	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0262	0.02610	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0262	0.03192	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0262	0.03507	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0262	0.02566	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0262	0.02590	Hipótesis Aceptada

Distribution: Weibull

Log likelihood: 20315

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 5.04487e-05

Variance: 3.70087e-10

Parameter Estimate Std. Err.

A 5.66215e-05 4.43943e-07

B 2.84341 0.0514003

- Escenario 4: 1 UE se aleja del eNB con velocidades de 3 mps

Para el tipo de video película (Categoría E) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo ITamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0669	0.0563	Hipótesis Aceptada
Extreme Value	0.0669	0.1189	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0669	0.0558	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme Value	0.0669	0.0989	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0669	0.0564	Hipótesis Aceptada
Log-Logistic	0.0669	0.0843	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0669	0.0980	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0669	0.0555	Hipótesis Aceptada
Nakagami	0.0669	0.0661	Hipótesis Aceptada
Negative Binomial	0.0669	0.0558	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0669	0.0793	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0669	0.0791	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0669	0.1050	Hipótesis Rechazada

Distribution: Lognormal

Log likelihood: -3731.83

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 99282.8

Variance: 3.34662e+08

Parameter Estimate Std. Err.

mu 11.489 0.0100132

sigma 0.182723 0.00709639

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0683	0.0983	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0683	0.0896	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0683	0.0742	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0683	0.0669	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0683	0.1468	Hipótesis Aceptada
Stable	0.0683	0.0672	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0683	0.3469	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0683	0.0692	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0683	0.0862	Hipótesis Rechazada

Distribution: Rician

Log likelihood: -264.24

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 3.06926
 Variance: 0.306978

Parameter Estimate Std. Err.
 s 3.01699 0.0318745
 sigma 0.559062 0.0225503

Slices tipo P

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2440	0.2677	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.2440	0.2487	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.2440	0.2674	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.2440	0.2730	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.2440	0.2529	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.2440	0.2514	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.2440	0.2628	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.2440	0.2670	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.2440	0.2673	Hipótesis Rechazada
Normal	0.2440	0.2617	Hipótesis Rechazada
Rician	0.2440	0.2666	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.2440	0.2433	Hipótesis Rechazada

Distribution: Weibull
 Log likelihood: -237.846
 Domain: $0 < y < \text{Inf}$
 Mean: 134877
 Variance: 1.46116e+07

Parameter Estimate Std. Err.
 A 136581 652.437
 B 44.5408 6.42499

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1883	0.1860	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1883	0.4028	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1883	0.2161	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1883	0.2305	Hipótesis Rechazada

Rician	0.1883	0.4038	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1883	0.4023	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1883	0.4038	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1883	0.2249	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1883	0.4038	Hipótesis Rechazada

Distribution: Extreme Value

Log likelihood: -12.53

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.214701

Variance: 0.161185

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.395388 0.0514694

sigma 0.313032 0.0329075

Slices tipo Audio

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0245	0.02877	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0245	0.02673	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0245	0.02418	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0245	0.02652	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0245	0.02652	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0245	0.04649	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0245	0.05861	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0245	0.05666	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0245	0.02665	Hipótesis Rechazada

Distribution: Logistic

Log likelihood: -16212

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1577.88

Variance: 27028.7

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1577.88 3.07288

sigma 90.6407 1.59299

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
---	--	--	--

PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0257	0.02982	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0257	0.02982	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0257	0.02666	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0257	0.02512	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0257	0.02592	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0257	0.02862	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0257	0.04243	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0257	0.03097	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0257	0.02785	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: 21099

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 5.22776e-05

Variance: 4.12496e-10

Parameter Estimate Std. Err.

mu 5.22776e-05 4.28363e-07

sigma 2.031e-05 3.02999e-07

- *Escenario 5*: UE se mueve alrededor del eNB con dirección y velocidad aleatoria

Para el tipo de video película (Categoría E) se presenta a continuación las pruebas de K-S para los slice tipo I, P y Audio, de acuerdo al tamaño del slice y tiempo relativo entre llegadas. Se resalta la PDF seleccionada que cumple la hipótesis nula formulada.

Slice tipo I

Tamaño de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.0704	0.0813	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.0704	0.1666	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.0704	0.0703	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.0704	0.1558	Hipótesis Rechazada
Inverse Gaussian	0.0704	0.0813	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.0704	0.1057	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0704	0.1236	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.0704	0.0821	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.0704	0.0852	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.0704	0.0891	Hipótesis Aceptada
Normal	0.0704	0.0990	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0704	0.0986	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0704	0.1373	Hipótesis Rechazada

Distribution: Gamma

Log likelihood: -3372.86

Domain: $0 < y < \text{Inf}$

Mean: 100556

Variance: 3.49172e+08

Parameter Estimate Std. Err.

a 28.9585 2.35097

b 3472.41 284.355

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0719	0.1107	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0719	0.0904	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0719	0.0748	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0719	0.0714	Hipótesis Aceptada
Rician	0.0719	0.0726	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0719	0.0728	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0719	0.3176	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0719	0.0729	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0719	0.0921	Hipótesis Rechazada

Distribution: Normal

Log likelihood: -243.784

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 3.00284

Variance: 0.319353

Parameter Estimate Std. Err.

mu 3.00284 0.0332996

sigma 0.565114 0.023608

Slices tipo PTamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Birnbaum-Saunders	0.2544	0.3645	Hipótesis Rechazada
Extreme Value	0.2544	0.3776	Hipótesis Rechazada
Gamma	0.2544	0.3651	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.2544	0.2543	Hipótesis Rechazada
Log-Logistic	0.2544	0.3292	Hipótesis Rechazada

Logistic	0.2544	0.3304	Hipótesis Rechazada
Lognormal	0.2544	0.3610	Hipótesis Rechazada
Nakagami	0.2544	0.3657	Hipótesis Rechazada
Negative Binomial	0.2544	0.3651	Hipótesis Rechazada
Normal	0.2544	0.3628	Hipótesis Rechazada
Rician	0.2544	0.3663	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.2544	0.3767	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Generalized Extreme Value**

Log likelihood: -210.37

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 134507

Variance: 1.01225e+07

Parameter Estimate Std. Err.

k 0.205751 0.240462

sigma 1716.02 354.561

mu 133083 433.957

Tiempo relativo entre llegada de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.1780	0.1714	Hipótesis Aceptada
Generalized Extreme	0.1780	0.4151	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.1780	0.1932	Hipótesis Rechazada
Normal	0.1780	0.2218	Hipótesis Rechazada
Rician	0.1780	0.3257	Hipótesis Rechazada
Stable	0.1780	0.3242	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.1780	0.3257	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.1780	0.1953	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.1780	0.3257	Hipótesis Rechazada

Distribution: **Extreme Value**

Log likelihood: -8.5651

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 0.188417

Variance: 0.120868

Parameter Estimate Std. Err.

mu 0.344883 0.0421271

sigma 0.27107 0.02837

Slices tipo Audio

Tamaño de *Slice*

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0228	0.02843	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0228	0.02744	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0228	0.02447	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0228	0.02737	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0228	0.02737	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0228	0.02366	Hipótesis Rechazada
Exponencial	0.0228	0.05147	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0228	0.02273	Hipótesis Aceptada
Weibull	0.0228	0.02702	Hipótesis Rechazada

Distribution: t Location-Scale

Log likelihood: -18520.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 1539.41

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

mu 1539.41 1.97618

sigma 52.6267 2.64139

nu 1.03931 0.0510632

Tiempo relativo entre llegada de Slice

Resultados Prueba de Bondad y Ajuste de Kolmogorov- Smirnof			
PDF Hipótesis	Valor crítico D	Estadístico de Prueba C	Resultado
Extreme Value	0.0239	0.02712	Hipótesis Rechazada
Generalized Extreme	0.0239	0.02840	Hipótesis Rechazada
Logistic	0.0239	0.02456	Hipótesis Rechazada
Normal	0.0239	0.03013	Hipótesis Rechazada
Rician	0.0239	0.03095	Hipótesis Rechazada
Stable	0.0239	0.02324	Hipótesis Aceptada
Exponencial	0.0239	0.04320	Hipótesis Rechazada
T Location-Scale	0.0239	0.02352	Hipótesis Rechazada
Weibull	0.0239	0.03292	Hipótesis Rechazada

Distribution: Stable

Log likelihood: 24590.7

Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$

Mean: 4.64466e-05

Variance:

Parameter Estimate Std. Err.

alpha 1.187 0.0387483

beta -0.373033 0.0396544

gam 8.51082e-06 1.00173e-06

delta 5.69423e-05 2.51508e-07

D.4 Parámetros de las funciones de densidad de probabilidad.

La Tabla D.1 presenta los parámetros que definen las diferentes funciones de densidad de probabilidad – PDF y que son utilizadas en este trabajo en la sección 4.3

Nombre	Parámetros de entrada			Representation
BirnbaumSaunders	β : scale	γ : shape		$\text{bspdf}(x, \beta, \gamma)$
Extreme Value	μ : location r	σ : scale r		$\text{evpdf}(x, \mu, \sigma)$
Gamma	a : shape	b : scale		$\text{gampdf}(x, a, b)$
Generalized Extreme Value	k : shape	σ : scale	μ : location	$\text{gevpdf}(x, k, \sigma, \mu)$
HalfNormal	μ : location	σ : scale		$\text{hnpdf}(x, \mu, \sigma)$
InverseGaussian	μ : scale	λ : shape		$\text{igpdf}(x, \mu, \lambda)$
Logistic	μ : mean	σ : scale		$\text{logpdf}(x, \mu, \sigma)$
LogLogistic	μ : log mean	σ : log scale		$\text{logLpdf}(x, \mu, \sigma)$
Lognormal	μ : log mean	σ : log standard deviation		$\text{lognpdf}(x, \mu, \sigma)$
Nakagami	μ : shape	ω : scale		$\text{nakpdf}(x, \mu, \omega)$
Normal	μ : mean	σ : standard deviation		$\text{normpdf}(x, \mu, \sigma)$
Rician	s : noncentrality	σ : scale		$\text{ricpdf}(s, \sigma)$
tLocationScale	μ : location	σ : scale p	v : shape	$\text{tlspdf}(x, \mu, \sigma, v)$
Uniform	a : lower endpoint	b : upper endpoint		$\text{unifpdf}(x, a, b)$
Discrete Uniform	n : maximum observable value			$\text{unidpdf}(x, n)$
Weibull	a : scale	b : shape		$\text{wblpdf}(x, a, b)$

Stable	a : scale	b : shape	σ :shape	$\text{sblpdf}(x,a,b, \sigma, \delta)$
			δ : location	

Tabla D.1. Parámetros de definición para PDFs

Anexo F

F. Estimación de la QoE

F.1 Módulos integrantes de la recomendación ITU-T P.1203

A continuación, y de acuerdo a la Figura 5.1 presentada en la sección 5.2, se describen de manera resumida los módulos y los elementos, de entrada y salida, que intervienen en la metodología de estimación subjetiva propuesta por la ITU-T.

- *Stream I.01*: Corresponde al flujo de vídeo de multimedia que será analizado.
- *Media Parameter Extraction Module (MPEM)*: Es responsable de extraer, dependiendo del modo de operación, la información y los parámetros a priori del flujo multimedia entrante. Este módulo genera las entradas *I.11* e *I.13*.
- *I.11*: Corresponde a la información de codificación de audio. Los parámetros considerados son: tasa de bits de audio, duración del segmento, número de *frame* de audio, tamaño de *frame* de audio, duración de los *frame* de audio, códec de audio, frecuencia de muestreo de audio, número de canales de audio y flujo de bits de audio.
- *I.13*: Corresponde a la información de codificación de video. Los parámetros inspeccionados son: tasa de bits de video, tasa de *frame* de video, duración del segmento, resolución de codificación de video, códec y perfil de video, número de *frame* de video, duración de *frame* de video, marca de tiempo de presentación de cuadro, marca de tiempo de decodificación de cuadro, tamaño de cuadro de video, tipo de cada imagen y video *bit-stream*.
- *Buffer Parameter Extraction Module (BPEM)*: el módulo de extracción de parámetros de búfer (BPEM) extrae la información de los eventos de *stalling*. La recomendación UIT-T. P.1203 solo consideran los siguientes estados de

transición: *stalling* inicial para reproducción, eventos de *stalling* en la reproducción, tiempo de reproducción y final. Este módulo genera la entrada *I.14*.

- *I.14*: Corresponde a los parámetros de *stalling* empleados por el módulo de estimación encargado de evaluar el impacto de los eventos de *stalling* en el búfer de almacenamiento. Los parámetros considerados son: inicio del evento de *stalling*, carga inicial y duración del evento.
- *I.GEN*: en este módulo, se agrega la información relacionada con la resolución de pantalla y el tipo de dispositivo. El tipo de dispositivo se define de la siguiente manera: PC / TV (tamaño de pantalla de 24 pulgadas o mayor y menor o igual a 100 pulgadas) y móvil (tamaño de pantalla de 10 pulgadas o menor). Es importante observar que los módulos MPEM, BPEM e I.GEN no están descritos en la recomendación UIT-T. Por lo tanto, para implementar el modelo será necesario definir su funcionalidad para extraer los parámetros de interés.
- *Pa: Audio Quality Estimation Module*: El módulo de estimación de calidad de audio se encuentra definido por la recomendación ITU-T P.1203.2 que hace parte de la recomendación P.1203 de la ITU-T, en éste se detalla el módulo que implementa la estimación de calidad de audio a corto plazo basada en flujo de bits. El algoritmo propuesto para implementar este modelo se presenta en [124], y se define en (F.1), (F.2) y (F.3), siendo *Bitrate* la tasa de bits de audio en Kbit/s.

$$0.21 = MOS_{fromR}(QA) \quad (F.1)$$

$$QA = 100 - Q_{codA} \quad (F.2)$$

$$Q_{codA} = a1A * e^{(a2A * Bitrate)} + a3A \quad (F.3)$$

La función *MOSfromR* se encuentra incluida en el anexo E de [29] y se obtiene de la siguiente manera:

$$MOS_{fromR}: \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$$

$$Q \mapsto MOS := MOS_{fromR}(Q)$$

$$MOS = MOS_{MIN} + (MOS_{MAX} - MOS_{MIN}) * \frac{Q}{100} + Q * (Q - 60) * (100 - Q) * 0.000007 \quad (F.4)$$

$$MOS = \min(MOS_{MAX}, \max(MOS, MOS_{MIN})) \quad (F.5)$$

Donde $MOS_{MAX} = 4.9$ y $MOS_{MIN} = 1.05$. Los coeficientes $a1A$, $a2A$, and $a3A$ dependen del códec de audio utilizado y son mostrado en la Tabla F.1[124]. La MOS en (F.5) corresponde a la salida O.21 (Calidad de codificación de audio por intervalo de muestreo de salida), que proporciona una puntuaciones de un segundo por sesión en una escala de calidad de 1 a 5.

Códec de Audio	a1A	a2A	a3A
MPEG1 L2	100.0	-0.02	15.48
AC3	100.0	-0.03	15.70
AAC-LC	100.0	-0.05	14.60
HE-AAC v2	100.0	-0.11	20.06

Tabla F.1. Coeficientes del modelo de audio para diferentes codecs

- *Pv: Video Quality Estimation Module*: El módulo de estimación de calidad de video se encuentra definido por la recomendación ITU-T P.1203.1 que hace parte de la recomendación P.1203 de la ITU-T. El algoritmo recomendado por el estándar para su implementación se describe en [29]. En este módulo se estima la degradación general sufrida por el flujo de video entrante debido a la representación de video (muestreo espacio/temporal y compresión de video), que se cuantifica mediante el parámetro D . D se calcula en función de las degradaciones de cuantificación (Dq), aumento de escala (Du) y temporal (Dt). Estas relaciones se presentan en las ecuaciones (F.6 – F.14).

$$D = \max(\min(Dq + Du + Dt, 100), 0) \quad (F.6)$$

$$Dq = 100 - R_{fromMOS}(\overline{MOS}_q) \quad (F.7)$$

$$Du = u1 \cdot \log_{10}(u2 \cdot (scaleFactor - 1) + 1) \quad (F.8)$$

$$Dt = \begin{cases} D_{t1} - D_{t2} - D_{t3}, & \text{framerate} < 24 \\ 0, & \text{framerate} \geq 24 \end{cases} \quad (F.9)$$

$$D_{t1} = \frac{100 \cdot (t1 - t2 \cdot framerate)}{t3 + framerate} \quad (F.10)$$

$$D_{t2} = \frac{Dq \cdot (t1 - t2 \cdot framerate)}{t3 + framerate} \quad (F.11)$$

$$D_{t3} = \frac{Du \cdot (t1 - t2 \cdot framerate)}{t3 + framerate} \quad (F.12)$$

$$D_t = \max(\min(Dt, 100), 0) \quad (F.13)$$

La calidad máxima de acuerdo con el aumento de escala puro y las degradaciones temporales se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{max} = \begin{cases} 100 - Du - \widehat{Dt}1, & \text{framerate} < 24 \\ 100 - Du, & \text{framerate} \geq 24 \end{cases} \quad (\text{F.14})$$

Entonces, la calidad (Q) se calcula de la siguiente forma:

$$\hat{Q} = 100 - D \quad (\text{F.15})$$

Finalmente, con (F.16) se obtiene el valor de la estimación de calidad de video, que corresponde a la salida del módulo Pv.

$$\widehat{MOS} = MOS_{fromR}(\hat{Q}) = 0.22 \quad (\text{F.16})$$

Donde \hat{Q} es la codificación de video estimada, con $\hat{Q} \in [0,100]$. MOS_{fromR} se describe en el Anexo E de [29] y D es la degradación general debida a la representación de video (muestreo espacial y temporal, compresión de video).

- *Pq: Quality Integration Module*: El módulo de integración de calidad se encuentra definido por la recomendación ITU-T P.1203.3 [125] que hace parte de la recomendación P.1203 de la ITU-T. Este módulo predice el impacto de las variaciones de calidad audiovisual y los eventos de *stalling* en la calidad experimentada por el usuario final en *streaming* multimedia móvil y aplicaciones de redes fijas que utilizan streaming con velocidad de bits adaptativa. Este módulo debe recibir información sobre la calidad estimada de las transmisiones de audio (O.21) y video (O.22) y la ocurrencia de eventos de bloqueo durante la reproducción (I.14, I.GEN). Se compone de dos submódulos: Pav: A / V y Pb.
- *Pav: A/V Integration/temporal*: Los resultados de este submódulo son la calidad de codificación del segmento audiovisual por intervalo de muestreo de salida (O.34) y el puntaje final de calidad de codificación audiovisual (O.35). O.34 se deriva de O.21 y O.22 como se muestra en (F.17), donde $t = [1,2, \dots, T]$, $av1 = -0,00069084$, $av2 = 0.15374283$, $av3 = 0.97153861$ y $av4 = 0.02461776$.

$$O.34_t = \max(\min(av_1 + av_2 * O.21_t + av_3 * O.22_t + av_4 * O.21_t * O.22_t, 5), 1) \quad (\text{F.17})$$

La calidad de codificación audiovisual final (O.35) considera la calidad audiovisual por intervalo de muestreo de salida (O.34), así como cualquier

efecto temporal y longitud media. El cálculo de O.35 se describe en la sección 8.3 de [125].

- *Pb: Quality Impact due to buffering*: El impacto de la calidad debida al búfer de almacenamiento. La salida de este módulo es el indicador porcentual de *stalling* O.23 (F.18). El cual es calculado basado en el número de eventos de *stalling* (*numStalls*), la suma ponderada de los eventos de *stalling* (*totalStallLen*) y el promedio del intervalo de tiempo entre eventos de *stalling* (*avgStallInterval*), donde $s_1=9.35158684$, $s_2=0.91890815$, y $s_3=11.056755$.

$$O.23 = 1 + 4 * SI \quad (F.18)$$

$$SI = \exp(-numStalls/s_1) * \exp\left(-\frac{totalStallLen}{T}/s_2\right) * \exp\left(-\frac{avgStallInterval}{T}/s_3\right) \quad (F.19)$$

- *Model output O.46*: El modelo de salida O.46. Este puntaje de calidad final de sesión de multimedia, se calcula en función de los eventos de *stalling*, la calidad de compresión audiovisual final (O.35), la predicción ($RF_{Prediction}$) del modelo de *Random Forest* - *RF* y la longitud media. Inicialmente, se calcula un valor temporal de O.46 (20) y luego se compensa con las diferencias en las calificaciones subjetivas debido a la heterogeneidad de las pruebas en diferentes laboratorios (F.21). Para el cálculo de $RF_{Prediction}$, el módulo de aprendizaje automático para la estimación de la calidad audiovisual presenta las características (con sus ID y valores) descritas en la cláusula 8.1.3 de [125] en un conjunto de 20 árboles de decisión, llamado, un *Random Forest*. Cada árbol de decisión tiene una profundidad máxima de 6.

$$O.46_{temp} = 0.75 * (1 + (O.35 - 1) * SI) + 0.25 * RF_{Prediction} \quad (F.20)$$

$$O.46 = 0.02833052 + 0.98117059 \cdot O.46_{temp} \quad (F.21)$$

F.2 Test de Ishihara para medir normal visión de colores

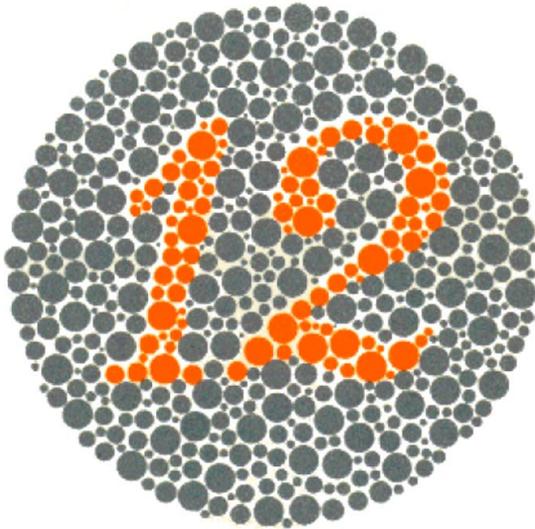
Los tests de percepción de los colores son usados para identificar posibles deficiencias adquiridas o hereditarias. Existen varios tests para detectar estas anomalías, como por ejemplo el test de Farnsworth, las cartas pseudocromáticas, el anomaloscopio, etc.

Los métodos más usados en estos tests son:

- Reconocimiento de figuras y símbolos dentro de un patrón de puntos. Este método facilita un rápido resultado.
- Ordenación de cápsulas de colores en el orden natural, desde el azul hasta el rojo pasando por diversos tonos intermedios. Esto permite determinar la deficiencia.
- O un juego de colores hecho por instrumentos especiales adaptados para determinar este problema.

Actualmente uno de los tests más usados es el de Ishihara [155]. Existen dos variantes a la hora de realizar el mencionado test, esto depende de si las personas que lo realizan conocen o no los números. Para personas mayores se suele hacer con números incrustados en puntos de colores, mientras que para niños pequeños se sustituyen dichos números por caminos de color entre dos puntos determinados. En nuestro caso se ha utilizado la versión numérica. El principio fundamental de éste reside en el reconocimiento de números o figuras geométricas hechas por pequeños puntos coloreados. A continuación, la Figura F.1 muestra las láminas mostradas a los 45 usuarios, de los cuales 4 presentaron algún error en la detección normal de la prueba.

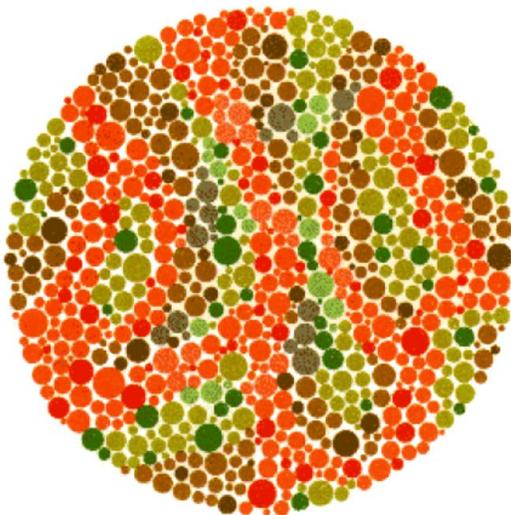
LÁMINA 1



Diagnóstico visual:

- Normal: Se observa un 12.
- Deficiente: Se observa un 12.

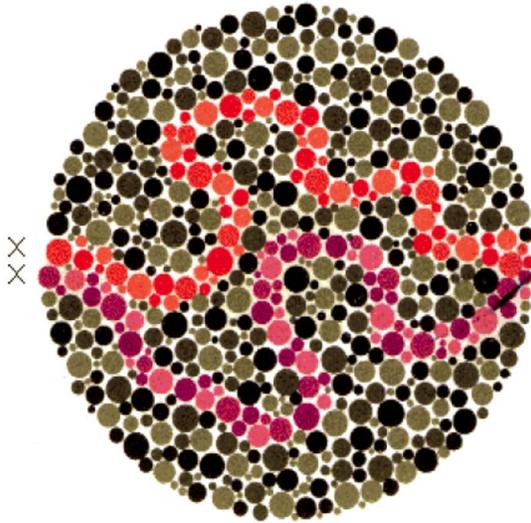
LÁMINA 14



Diagnóstico visual:

- Normal: No se observa ningún número.
- Deficiente: Se observa un 5 con deficiencia para la percepción rojo-verde.

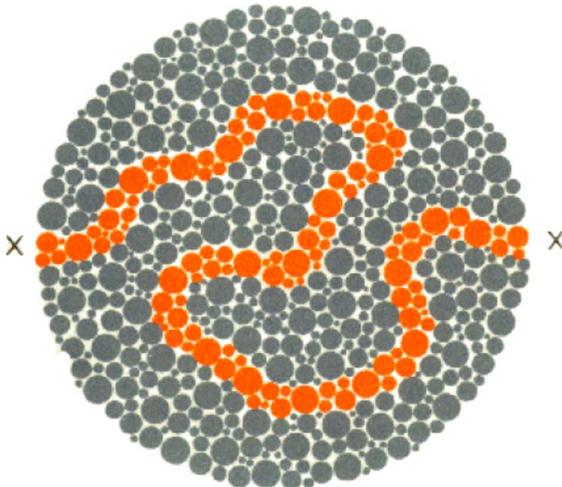
LÁMINA 18



Diagnóstico visual:

- Normal: Se observan los dos caminos.
- Deficiente:
 - Protanopía → sólo se ve el camino morado.
 - Protanomalia → ambos caminos pero el morado más fácilmente.
 - Deuteranomía → sólo se ve el camino rojo.
 - Deuteranomalia → ambos caminos pero el rojo más fácilmente.

LÁMINA 24



Diagnóstico visual:

- Normal: pueden trazar una línea entre las dos X.
- Deficiente: pueden trazar una línea entre las dos X.

Figura F.1. Láminas del test de Ishihara

La versión original de la prueba con láminas de los mapas de colores (por Dr. Shinobu Ishihara) fue diseñada para ser realizada en un cuarto iluminado adecuadamente por luz diurna. La presencia de la luz del sol directa o de la luz artificial, pueden producir una cierta discrepancia en los resultados debido a la alteración en el aspecto de las sombras del color, por tanto, hay que evitar los reflejos en la zona de visión. Esto, junto

con otros aspectos, forma parte de las condiciones de realización del test. En este experimento se realiza la prueba en la pantalla de un computador portátil.

A continuación, se describe el procedimiento para la realización del test:

- Situarse de forma adecuada frente a la pantalla del ordenador.
- Colocar la pantalla a la distancia (aproximadamente 75 cm.) y ángulo (máximo de 30° sobre la normal) correctos para una buena visión y evitar que reflejos de luz incidan sobre ésta.
- Observar la lámina que aparece en pantalla y contestar en el espacio correspondiente del documento.

Una vez realizado el test de *Ishihara*, se realiza la comprobación en el lugar de las respuestas para decidir si los encuestados eran aptos para la realización de la fase posterior.

A continuación, se muestra el formato del test de *ishihara* aplicado.

Prueba Ishihara

Instrucciones

A continuación, y de acuerdo al número de lámina que se presenta en la pantalla seleccione la o las respuestas correctas a las siguientes 4 preguntas:

1. De la lámina 1 se puede afirmar lo siguiente:

- Se observa un 19 naranja.
- Se observa un 19 azul.
- Se observa un 12 naranja.
- Se observa un 12 azul.
- No se observa ningún número.

2. De la lámina 14 se puede afirmar lo siguiente:

- Se observa un 40 verde y café.
- Se observa un 18 verde y café.
- Se observa u 12 verde y café.
- Se observa un 5.
- No se observa ningún número.

3. De la lámina 18 se puede afirmar lo siguiente:

- Se ve un camino morado.
- Se ve un camino rojo.
- Se ven dos caminos, pero se ve mejor el morado.
- Se ven dos caminos, pero se ve mejor el rojo.
- Se ven dos caminos, uno rojo y otro morado.

4. De la lámina 24 se puede afirmar lo siguiente:

- Se puede trazar una línea entre las dos x.
- No puede trazar la línea entre las dos x.

F.3 Test para medir agudeza visual

Para realizar esta prueba siga las siguientes instrucciones:

1. Imprima el panel de Snellen (ver Figura F.2) en una página de formato estándar A4 y colóquese a unos 2,8 metros frente a ella. Si la página tiene otro tamaño o si usted prefiere hacer la prueba mirando la pantalla, tendrá que calcular la distancia a la cual debe posicionarse con la siguiente fórmula: mida la altura de la letra E (primera línea, 20/200) en milímetros. Divida el valor de la medida por 88 y luego multiplique por 6. El resultado muestra la distancia, en metros, a la cual debe colocarse frente al panel.

Ej. $(42/88) \times 6 = 2,8$ m.

2. Haga la prueba con buena luminosidad y con corrección (lentes de contacto o anteojos), si usted la utiliza.
3. Haga la prueba con un ojo a la vez, para empezar con el ojo derecho, cubra el izquierdo sin presionarlo, para examinar el ojo izquierdo haga lo contrario. Si utiliza anteojos correctores, puede cubrir el ojo con una hoja de papel.
4. Lea la carta de letras desde la más grande a la más pequeña.
5. Para que el examen sea más fácil, permita que una segunda persona vaya indicando las letras que usted debe leer en las diferentes líneas de letras.

6. Si usted puede leer las letras de la línea que corresponde a la agudeza visual 20/20, su visión es óptima.
7. Si su agudeza visual es menor que 20/20 o si tiene dudas sobre su visión, acuda a su oftalmólogo.

NOTA: Tome los resultados como una orientación. Los resultados NO indican un diagnóstico. El realizar esta prueba en ningún caso le permite saltar un control regular con el oftalmólogo, ya que se puede fácilmente omitir signos que sólo un médico entrenado puede encontrar.

E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
F E L O P Z D	7	20/25
D E F P O T E C	8	20/20
L E F O D P C T	9	
F D P L T C E O	10	
P E Z O L C F T D	11	

Figura F.2. Test de Snell

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 LTE.

Las secuencias tienen diferentes temas de observación a las cuales se les ha introducido de forma controlada diferentes tiempos de retardo. Las mencionadas 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 número de secuencia que ha observado. Para determinar su criterio de calidad, tenga en cuenta: el color de la imagen, la resolución, la borrosidad, la continuidad del movimiento, si se presenta parpadeo, el tiempo de espera en el inicio de la reproducción. Observe detenida y cuidadosamente toda la secuencia antes de emitir su juicio. No tenga en cuenta el contenido del vídeo, por ejemplo, noticias, documentales, animaciones, si la secuencia es molesta o aburrida. 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. Comenzaremos con un bloque de secuencia de práctica. Después de eso, el experimento dará inicio y se presentarán dos bloques de secuencias de 20 minutos aproximadamente.

¿Tiene alguna pregunta antes de que inicio el experimento?

F.4 Formularios de consentimiento

El formulario de consentimiento es firmado por 41 usuario que voluntariamente realizaron la prueba de evaluación subjetiva de video.

Experimento de calidad de vídeo

Formulario de consentimiento informado

Investigador: **Héctor Fabio Bermúdez Orozco.**

Héctor Fabio Bermúdez Orozco, estudiante del Doctorado en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca está realizando un experimento subjetivo para obtener la calidad de experiencia del servicio de Live Video Streaming en una red emulada LTE. Los resultados de este experimento servirán para evaluar el impacto de diferentes factores en la calidad del vídeo.

Usted ha sido seleccionado para formar parte de un grupo de personas que pueden participar en este experimento subjetivo sobre la calidad del vídeo. En este experimento, le pedimos que evalúe la calidad del vídeo de un conjunto de escenas. En el laboratorio de usabilidad de la Universidad del Quindío, verá las secuencias de video en un computador portátil. Deberá especificar su opinión sobre la calidad percibida del vídeo seleccionando una opción dentro de la hoja de calificaciones que se le proporcionará. No se espera que los participantes en este experimento de calidad de video estén sometidos a algún riesgo o incomodidad. Este experimento cumple con la Recomendación ITU-T P.911 y P.913.

Se le pedirá que participe en tres sesiones de visualización. Antes de la primera sesión, escuchará las instrucciones durante 3 minutos y participará en una sesión de práctica de 4 minutos. Durante cada sesión, observará y calificará secuencias de vídeo durante 20 minutos. En total, el tiempo requerido para participar en este experimento se estima en 27 minutos. De este tiempo, aproximadamente 4 minutos estarán destinados para calificar la calidad de vídeo.

Este experimento se llevará a cabo durante los días 21 de junio al 10 de julio de 2019 e incluirán 40 sujetos. Las identidades de los sujetos se mantendrán en total confidencialidad. Sus calificaciones de calidad se identificarán por un número asignado al comienzo del experimento.

La participación en este experimento es completamente voluntaria. La negativa para participar no conllevará ninguna penalización y usted puede interrumpir la participación en cualquier momento. Si tiene alguna pregunta acerca de los derechos

de los sujetos de investigación o en el caso de una lesión relacionada con la investigación del tema, póngase en contacto con Héctor Fabio Bermúdez Orozco al celular 3206671107.

Si tiene alguna pregunta sobre este experimento o la investigación de calidad de vídeo, comuníquese con Héctor Fabio Bermúdez Orozco al celular 3206671107o dirección de correo electrónico hfbermudez@uniquindio.edu.co. Por favor, firme a continuación para indicar que ha leído la información anterior y acepta participar en este experimento de calidad de vídeo.

Nombre:

Identificación:

Firma:

F.5 Cuestionario de la evaluación

La Figura F.3 muestra una imagen del cuestionario de evaluación aplicado a los usuarios en la prueba subjetiva.

EXPERIMENTO DE CALIDAD DE VIDEO DEL SERVICIO DE LVS EN REDES LTE

Identificación Evaluado: _____ Fecha: _____ Sesión/consecutivo: _____

Edad: _____ Sexo: M F

➔ Número de Secuencia ➔

Bloque 1	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">E1</td><td style="width: 25%; text-align: center;">E2</td><td style="width: 25%; text-align: center;">E3</td><td style="width: 25%; text-align: center;">E4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> </table>	E1	E2	E3	E4	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td></tr> </table>	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Aceptable	Aceptable	Mediocre	Mediocre	Mala	Mala																																																	
E1	E2	E3	E4																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
Excelente	Excelente																																																																																				
Buena	Buena																																																																																				
Aceptable	Aceptable																																																																																				
Mediocre	Mediocre																																																																																				
Mala	Mala																																																																																				
Bloque 2	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 8.3%; text-align: center;">1</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">2</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">3</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">4</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">5</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">6</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">7</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">8</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">9</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">10</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">11</td><td style="width: 8.3%; text-align: center;">12</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td></tr> </table>	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Aceptable	Aceptable	Mediocre	Mediocre	Mala	Mala	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																										
[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]																																																																										
[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]																																																																										
[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]																																																																										
[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]																																																																										
[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]																																																																										
Excelente	Excelente																																																																																				
Buena	Buena																																																																																				
Aceptable	Aceptable																																																																																				
Mediocre	Mediocre																																																																																				
Mala	Mala																																																																																				
Bloque 3	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">1</td><td style="width: 25%; text-align: center;">2</td><td style="width: 25%; text-align: center;">3</td><td style="width: 25%; text-align: center;">4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td><td style="text-align: center;">[]</td></tr> </table>	1	2	3	4	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Excelente</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Buena</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Aceptable</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mediocre</td></tr> <tr><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td><td style="width: 25%; text-align: center;">Mala</td></tr> </table>	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Aceptable	Aceptable	Mediocre	Mediocre	Mala	Mala																																																	
1	2	3	4																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
[]	[]	[]	[]																																																																																		
Excelente	Excelente																																																																																				
Buena	Buena																																																																																				
Aceptable	Aceptable																																																																																				
Mediocre	Mediocre																																																																																				
Mala	Mala																																																																																				

Figura F.3. Cuestionario de evaluación