

Estado del arte de los métodos de evaluación de QoE y entornos de emulación para el servicio de video en redes LTE¹

State of the art of QoE assessment methods, and emulation environments for the video service in LTE networks

Estado da arte dos métodos de avaliação de QoE e ambiente de emulação para o serviço de vídeo em redes LTE

H. F. Bermúdez, J. L. Arciniegas y E. Astaiza

Recibido Febrero 09 de 2016 – Aceptado Mayo 30 de 2016

Resumen—Este artículo presenta una revisión de los métodos utilizados actualmente para medir la Calidad de la Experiencia - QoE y Calidad de Servicio - QoS para servicio de vídeo usando técnicas de videostreaming a través de un proveedor de servicio de internet, se enuncian las principales diferencias entre las métricas objetivas y subjetivas, escenarios de uso y los inconvenientes presentados en un ambiente inalámbrico. 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. Adicionalmente el artículo describe los retos y brechas de investigación en la evaluación y medición de la calidad de la experiencia para servicios de video soportados por tecnologías inalámbricas.

Palabras clave— emulación, LTE, modelado, QoS, QoE, tráfico, video.

Abstract—This article presents a review of the methods currently used to measure Quality of Experience - QoE and Quality of Service - QoS for video service using techniques of streaming video through an internet service provider, the main differences are enunciated between objective and subjective metrics, use scenarios and disadvantages presented in a wireless environment. In addition, the radio access technology - RAN Long Term Evolution - LTE as the radio access technology and wireless technology most likely to be used in the coming years is presented, development tools for handling platforms emulation systems LTE are compared. Additionally, the article describes the challenges and research gaps in evaluating and measuring the quality of experience for video services supported by wireless technologies.

Key words— emulation, LTE, modeling, QoS, QoE, traffic, video.

¹Producto derivado del proyecto de investigación, Propuesta de tesis doctoral "Modelado De Tráfico Para El Servicio De Video En Vivo En Redes Móviles LTE Con Parámetros De QoE"; GIT -Grupo de Investigación en Ingeniería Telemática, Programa de Doctorados Nacionales (Convocatoria 647 de 2014) - Facultad de Ingeniería y Telecomunicaciones, Colciencias - Universidad del Cauca.

H. F. Bermúdez Orozco. Estudiante Doctorado en Ingeniería Telemática Universidad del Cauca, MSc. Electrónica y Telecomunicaciones. Profesor Asociado Universidad del Quindío, Quindío (Colombia), investigador grupo GITUQ, email: hfbermudez@uniquindio.edu.co.

J. L. Arciniegas Herrera. Ph.D. y MSc. en Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Profesor Titular Departamento de Telemática Universidad del Cauca. Investigador Grupo en Ingeniería Telemática -GIT, Universidad del Cauca, Popayán (Colombia), email: jlarci@unicauca.edu.co.

E. Astaiza Hoyos. Ph.D (c) Ciencias de la Electrónica, MSc. en Ingeniería con énfasis en Telecomunicaciones. Profesor Asociado Universidad del Quindío, Quindío (Colombia), Investigador grupo GITUQ, email: eastaiza@uniquindio.edu.co

Resumo - Este artigo apresenta uma revisão dos métodos utilizados atualmente para medir a qualidade da experiência QoE e Qualidade de Serviço - QoS para serviço de vídeo usando técnicas de videostreaming através de um provedor de serviço de internet, se mostram as principais diferenças entre as métricas objetivas e subjetivas, cenários de uso e os inconvenientes apresentados num ambiente de rede sem fio. Além disso se apresenta a tecnologia de acesso de rádio - RAN Long Term Evolution - LTE como a tecnologia de rede sem fio com maior probabilidade de utilização nos próximos anos, para o qual se

comparam as ferramentas de desenvolvimento para o manejo de plataformas de emulação para sistemas LTE. Adicionalmente o artigo descreve os retos e brechas de pesquisa na avaliação e medição da qualidade da experiência para serviços de vídeos suportados por tecnologias de redes sem fio.

Palavras chave - emulação, LTE, modelagem, QoS, QoE, tráfico, vídeo.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los enormes avances y el desarrollo tecnológico en el campo de las telecomunicaciones han permitido que el mercado y consumo electrónico tenga una nueva dinámica [1]. La gran variedad de dispositivos móviles tales como: notebooks, tablets, smartphones, iPhones, iPads, etc. soportan múltiples servicios multimedia, como aplicaciones de streaming de video en tiempo real (Live Video Streaming - LVS) o bajo demanda - VoD y servicios de audio y video en tiempo real a través de internet [2]. Lo anterior ha generado que el tráfico de datos en el entorno móvil haya presentado un incremento asombroso; según estadísticas presentadas por [3] y [4] a principios del 2015 el número total de suscripciones móviles superó la población mundial, producto de un crecimiento sostenido del 7% anual, con 108 millones de adiciones registradas netas en tan solo el primer trimestre de 2015. El porcentaje de tráfico de video con respecto al tráfico total de datos móviles fue del 53% en el 2013 y se espera supere el 69% para el año 2018, exigiendo un mayor uso del limitado ancho de banda de los canales inalámbricos [3]. Ante la situación anterior surge la pregunta: ¿Qué tecnología de red de acceso de radio (RAN) en entornos móviles soportará los mencionados volúmenes de tráfico?

Dos décadas atrás, las redes GSM (Global System for Mobile Communication) fueron desarrolladas inicialmente para proveer servicios de telefonía móvil, mediante algunas mejoras tales como GPRS (General Packet Radio System) y EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution) para la entrega de servicios de datos a usuarios móviles [5]. Recientemente, las redes WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) conocidas más comúnmente como UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) fueron planeadas para entregar servicios de multimedia tales como video telefónico y servicios de paquetes de datos de banda ancha, de las cuales HSPA (High Speed Packet Access) permite tasas de datos del orden de los 21 Mbps. Hoy en día y para apoyar los mencionados pronósticos de tráfico, nuevos sistemas inalámbricos tales como 3GPP LTE (Long Term Evolution) han sido introducidos para permitir transmisiones con alta velocidad de datos y baja latencia de extremo a extremo, los cuales son requisitos clave de aplicaciones de video; LTE está basada en tecnología de radio OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) proporcionarán tasas de datos del orden de decenas de Mbps [4]. En el 2020, la cobertura de la población LTE en Europa se espera sea de alrededor del 85%, en donde se presenta un índice de penetración de suscripciones de LTE del 30%,

aunque se presentarán grandes diferencias entre Europa Occidental, Central y del Este. En América del Norte con un índice de penetración de suscripciones de LTE del 85%, se pronostica al 2020 una población de LTE alrededor del 100%. Se proyecta que la cobertura de población para LTE en el Noreste de Asia y Latinoamérica sea del 90% en 2020, con niveles de penetración actual del 40% en cada región; para el mismo año se espera que China alcance más de 700 millones de suscripciones, lo que representa más del 25% del total de suscripciones globales para LTE [4], [6], [7].

Las anteriores cifras dejan en evidencia el potencial de LTE como la red de acceso de radio – RAN preferida para dar soporte a el tráfico móvil de datos pronosticado por los principales fabricante y proveedores de servicios de telecomunicaciones a nivel mundial, aunque existen algunas regiones con bajo índice de penetración. Adicionalmente, se ha identificado que las organizaciones de normalización, alianzas, y los operadores de redes requieren mediciones más realistas para mejorar la calidad de servicio (Quality of Service - QoS) y calidad de la experiencia (Quality of Experience – QoE) de los servicios desplegados sobre LTE en general, ya que la mayoría de las configuraciones de servicio y de red disponibles en la literatura se derivan de simulaciones [8]; como es ampliamente conocido, en los procesos de modelado de sistemas de comunicación para simulación, algunos detalles se pueden perder, y por lo tanto, resultados engañosos se pueden obtener [6], [9].

Por otra parte, una alternativa de arquitectura de solución para hacer frente a los crecientes niveles de tráfico de datos móviles y requisitos de servicios se enfoca en vastas investigaciones sobre la combinación de Redes de Distribución de Contenidos (Content Delivery Network – CDN) con redes Peer To Peer (P2P) heterogéneas de WiFi o WLAN con 3GPP-LTE[2],[10], [11], [12], [13], [14], [15].

Una de las áreas de mayor interés entre la comunidad científica y prestadoras de servicio en las comunicaciones móviles inalámbricas es la calidad. Es prácticamente imposible ignorar la QoE del usuario final y la QoS del servicio móvil entregada. Por un lado se tiene la QoE en función de la percepción del usuario del desempeño del servicio móvil, por otro lado la QoS en función de la calidad entregada y requerida entre un equipo de usuario (UE) y la red de acceso de radio (RAN) al igual que el Core de la red (CN) [5].

El principal objetivo de este artículo es presentar una revisión bibliográfica actualizada de los diferentes métodos para la evaluación y medición de la QoE y QoS del servicio de video, enfocándose en la tecnología de acceso de radio LTE. Se presentan conceptos de QoE y QoS y los factores que influyen en cada uno de ellos. Adicionalmente se introduce la importancia del uso de ambientes de emulación que son de gran utilidad para la realización de este tipo de mediciones, específicamente emulaciones a partir del simulador de redes NS3 (Network Simulator 3).

El artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección II se presentan conceptos generales de QoS y QoE. En la sección III se muestra una visión general de los métodos de medición de QoE para el servicio de video. En la sección

IV se presentan los trabajos relacionados con streaming de video y ambientes de emulación planteados para LTE, en donde se enfatiza sobre los inconvenientes encontrados. En la sección V se presentan los retos y una propuesta de investigación en esta área. Finalmente se presentan las conclusiones

II. CONCEPTOS GENERALES

A. Calidad de Servicio- QoS

La QoS es definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones como un conjunto de características de un servicio de telecomunicaciones que se enfocan a la satisfacción del usuario [16], [17]. Por otro lado, la Internet Engineering Task Force (IETF) la define como un conjunto de requisitos para el transporte de flujo de datos de un servicio en particular [18]. Entre los parámetros más utilizados para medir la QoS se encuentran: Ancho de Banda, Retardo, Jitter, Throughput y Tasa de Pérdida de Paquetes. Adicional a la QoS, un servicio puede ser evaluado de acuerdo al grado de servicio (GoS) y a la calidad de Resiliencia (Quality of Resilience - QoR). El GoS se relaciona con eventos que ocurren durante la comunicación entre el servidor y el cliente, tales como: configuración, liberación y mantenimiento; está basado en parámetros tales como: ajuste de tiempo, probabilidad de bloqueo de comunicación, retardo de autenticación de cliente y probabilidad de descarte de conexión. La tasa de supervivencia de flujo de datos en una red se evalúa por el QoR, el cual considera el tiempo que tarda en recuperarse de una conexión rota o de la disponibilidad del servicio del servidor. Por otra parte, cuando la conexión se restablece después de un fallo en la comunicación, el QoR es responsable de verificar si el nivel de GoS y la QoS son los mismos que estaban antes de la falla en la conexión, si la ruta restablecida para entregar el contenido está congestionada y cuántos paquetes se perdieron durante la interrupción del servicio. En un servicio de streaming de vídeo, una medición de QoS se produce dentro de la red utilizada para transmitir paquetes de datos desde el servidor al receptor del usuario. Este tipo de evaluación se llama red QoS (NQoS). Además, es posible investigar la relación entre los parámetros de QoS y la calidad de vídeo percibida por el usuario (QoS percibida - PQoS). Con el paso de los años, este término se ha convertido en QoE, donde la atención se centra en la experiencia del usuario y no en la calidad específica del servicio prestado [19].

B. Calidad de la Experiencia (QoE).

Calidad de experiencia (QoE) es una medida subjetiva de la calidad experimentada por un usuario cuando utiliza un servicio de telecomunicaciones. El objetivo perseguido al evaluar la QoS puede ser el deseo de optimizar el funcionamiento de la red desde una perspectiva puramente basada en parámetros objetivos, además de determinar la calidad que el usuario está realmente logrando, así como su nivel de satisfacción. Sin embargo, la QoE va más allá

y tiene en cuenta la satisfacción que un usuario recibe en términos del contenido y uso de las aplicaciones [20].

En términos de calidad de servicio, el streaming de video y VoIP son servicios más sensibles a los problemas de calidad en comparación con servicios como el correo electrónico o FTP. Para mantener la transmisión de vídeo a un nivel aceptable de QoE, se deben de identificar los factores que potencialmente pueden afectar. La Fig. 1 ilustra diversos factores técnicos y no técnicos que contribuyen en la QoE del servicio de streaming de vídeo [21].

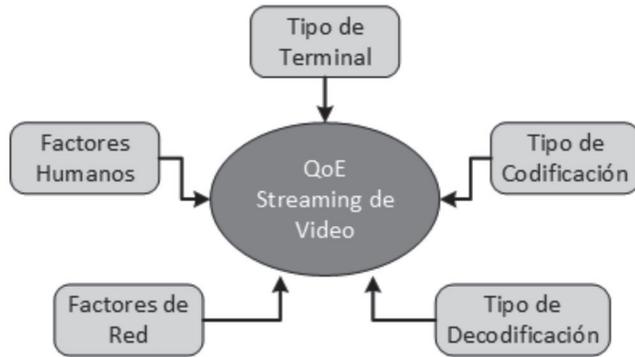


Fig. 1. Factores que contribuyen en la QoE de un servicio de streaming de vídeo. Fuente: Tomada y modificada de [21]

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, regular o mala. También se debe de tener en cuenta el costo, la disponibilidad, la facilidad de uso y la fidelidad. No hay métricas bien definidas de QoE cuando se compara con QoS, ya que depende de la percepción de cada usuario. La Fig. 2 muestra zonas de posible relación entre QoE y QoS; en la región 1 en donde no existe ningún tipo de perturbación durante la transmisión de video desde el servidor al receptor se considera la QoE excelente. En la región 2 existen algunas fallas durante la transmisión de video (pérdida de paquetes o retardos) por lo tanto la satisfacción del usuario decrece. En la región 3 el usuario deja de observar el contenido resultado de la fuerte degradación de QoS, lo cual se traduce en un QoE inaceptable [22]

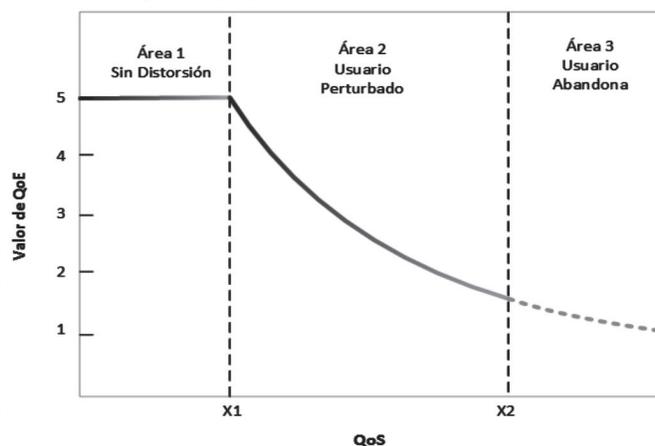


Fig. 2. Curva de correlación entre QoS y QoE. Fuente: Tomada y modificada de [22]

De acuerdo a [19] 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. La red Europea sobre Calidad de la Experiencia en Sistemas y Servicios de multimedia define tres grupos principales de factores que influyen la QoE: Factores Humanos, tales como la demografía y Factores Socio-económicos, constitución física y mental, estado emocional del usuario; Factores del Sistema, entre los que se encuentran captura del medio, reproducción y dispositivos de transmisión; y los Factores Contextuales como: el entorno físico del usuario, factores temporales, sociales, económicos y técnicos.

III. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE QOE PARA EL SERVICIO DE VIDEO

Entre los servicios que más han influido en el crecimiento del tráfico de datos actual se encuentra el Video bajo Demanda VoD, el Video en Vivo y la Televisión IP (IPTV) [3], [4]. Los anteriores se transmiten usando técnicas de streaming a través de un proveedor de servicios de internet. La Fig. 3 muestra una infraestructura típica utilizada para proporcionar servicio de streaming de video, donde se identifican tres componentes principales: la cabecera, el core de red y la red de usuario. En el core los contenidos de vídeo son creados, editados, codificados y almacenados en una base de datos de multimedia y se ponen a disposición de un servidor de streaming. El contenido se divide en varios paquetes y se transmiten al usuario a través del core de red; finalmente el usuario a través de un nodo de acceso puede desplegar el contenido en sus dispositivo [19].

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 realizar 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 tareas mencionadas son mucho más complejas en un ambiente inalámbrico, 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 multirayectos, desvanecimientos, interferencia, ruido, etc. [23], [19], [24].

El éxito de la medición de calidad de video (Video Quality Assessment - VQA) es desarrollar métrica cuantitativa que pueda predecir automáticamente la calidad percibida del video. Los métodos de VQA se pueden clasificar en subjetivos y objetivos. Las métricas de VQA objetivas se utilizan principalmente para evaluar la diferencia entre un video de referencia y un video de prueba. Las VQA subjetivas son capaces de medir, con confiabilidad, la calidad del video que es percibida por el Sistema Visual Humano (HVS) realizada por los usuarios; los cuales pueden ser observadores no expertos y expertos. Los primeros, en general enfocan su atención en el video, por el contrario los expertos se concentran en detalles. Además, para cumplir con las recomendaciones de la UIT-T para VQA subjetivas, las pruebas tienen que seguir una evaluación estricta de condiciones, incluidas las condiciones de distancia de visión, iluminación de la sala, duración de la prueba y la selección de evaluadores [25] [26]. Aunque con los métodos de VQA subjetivos se puede obtener de forma fiable la calidad de video percibido, no son capaces de generar mediciones instantáneas de la calidad del vídeo; además de requerir un lapso considerable de tiempo, son mucho más laboriosos y costosos. Lo anterior ha permitido que los métodos de VQA objetivos tengan mayor aplicación y exista un creciente interés y desarrollo de algoritmos. Al igual que los VQA

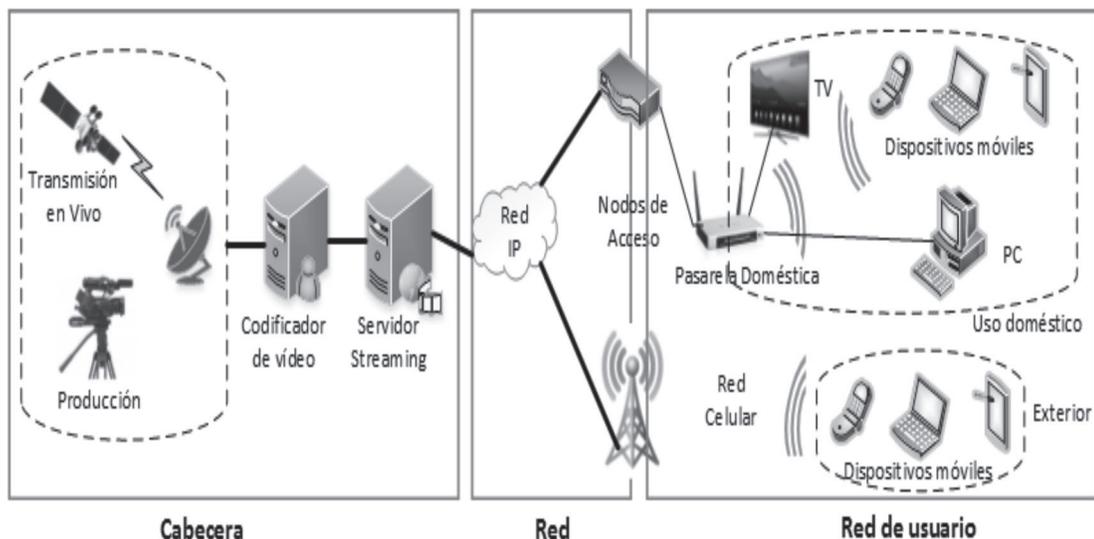


Fig. 3. Arquitectura básica para un servicio de streaming de video Fuente: Tomada y modificada de [19]

subjetivos, los VQA objetivos requieren de métricas que generen resultados de calidad de video percibido y con un alto grado de correlación con las evaluaciones subjetivas realizadas por los usuarios [25].

El grupo de expertos de Calidad de video (VQEG) es el principal foro que valida los modelos objetivos de métricas de calidad de video que resultan en recomendaciones y estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para aplicaciones de televisión y multimedia

Dependiendo de la cantidad de información disponible del video de referencia, los VQA objetivos se estudian a partir de las mediciones de calidad de imagen (IQA), las cuales se clasifican de acuerdo a la información de las imágenes que componen dicho video en tres categorías: IQA de referencia completa (FR), IQA de referencia reducida (RR) e IQA sin referencia (NR). En los algoritmos FR-IQA, se necesita información completa de la imagen de referencia para predecir la calidad de imágenes degradadas o distorsionadas. El enfoque más sencillo en la aplicación de un algoritmo de FR-IQA es mediante la medición de disparidad de píxeles entre las imágenes de referencia y distorsionadas. Las métricas de calidad de esta categoría más utilizadas son el error medio cuadrático (MSE) y la relación de pico de señal a ruido (PSNR), aunque se conoce que las anteriores no tienen un grado de correlación con las IQA subjetivas [27]. Cuando se utiliza FR-IQA basada en la estructura de la imagen, se parte del hecho de que una imagen de buena calidad tiene una estructura similar a la imagen original, por lo tanto se pueden enfocar las medidas de IQA a los cambios de la estructura de la imagen en estudio, tal como la luminancia, contraste, fase o gradiente. Algunos ejemplos de métricas para este tipo de enfoque son: índice universal de calidad de imagen (UQI), índice estructural de similitud (SSIM), multi-escala SSIM (MS-SSIM), SSIM complejo wavelet (CW-SSIM), índice de similitud característico (FSIM), resistencia de borde SSIM (ESSSIM), congruencia fase híbrida IQA (IQA-HPC), gradiente de similitud visual (VGS) y métrica basada en ajuste de búsqueda (MP_Q). Otro enfoque se basa en la estadística de la imagen, el cual se basa en medidas estadísticas y por lo general se complementa con técnicas de máquinas de aprendizaje. Algunas métricas usadas para este tipo de mediciones son: criterio de fidelidad de la información (CFI), fidelidad de la información visual (VIF), descomposición de valor singular (SVD) y máquina de aprendizaje para medir la calidad de la imagen (MLIQM) [28].

A diferencia de los algoritmos de FR-IQA, los algoritmos de RR-IQA sólo necesitan parte de la información de referencia. Un conjunto mínimo de parámetros de la imagen de referencia se extraen y luego se usa con la imagen distorsionada para determinar la calidad de imagen [29]. Los algoritmos de RR-IQA se pueden clasificar en tres grupos. El primer grupo RR-IQA se basa en los modelos de fuentes de imagen. Estos modelos capturan propiedades estadísticas de bajo nivel de las imágenes naturales en dominios de transformadas, tales como la transformada discreta wavelet (DWT) [30], [31], o transformada discreta del coseno (DCT)[32]. La segunda clase de algoritmos RR-IQA son

encargados de capturar las distorsiones de la imagen. Este tipo de métodos requieren de la información suficiente del proceso de distorsión generado por las imágenes al igual que la imagen estándar o la compresión de video para estimar la calidad de las imágenes recibidas. Por último, los algoritmos RR-IQA se basan en los modelos de receptores de imagen donde se utiliza el modelo fisiológico y/o psicofísico de la visión [28]. Un alto grado de correlación con medidas subjetivas de la calidad de la imagen se obtiene con los algoritmos mencionados; dicha correlación depende de la cantidad de información disponible.

En muchos casos, especialmente en servicios de tiempo real, la disponibilidad de cualquier información de referencia es prácticamente imposible; en esos casos se utilizan los algoritmos de NR-IQA. El objetivo de los algoritmos NR-IQA es estimar la calidad de las imágenes distorsionadas con respecto a las medidas de percepción subjetivas sin tener que utilizar ninguna referencia. En general, estos algoritmos se pueden clasificar en dos categorías dependiendo del conocimiento previo del tipo de distorsión en: distorsión específica (DS) y los de no distorsión específica (NDS); múltiples tipos de distorsión se pueden presentar en una imagen, es por eso que los algoritmos NR-IQA universales o genéricos que son sensibles a múltiples distorsiones son preferidos en aplicaciones de tiempo real. Los algoritmos NDS NR-IQA no conocen de manera previa el tipo de distorsión; en su lugar, la puntuación de la calidad se administra a través de la suposición de que la imagen evaluada tiene un tipo de distorsión similar a las de la base de datos de entrenamiento. La mayoría de los algoritmos de NDS NR-IQA son diseñados bajo el enfoque de estadísticas de escenas naturales o enfoque de aprendizaje o formación [28] [33]. La Fig. 4 muestra de manera gráfica la clasificación de los diferentes métodos para la medición de calidad de imagen (IQA) utilizadas en VQA objetivos.

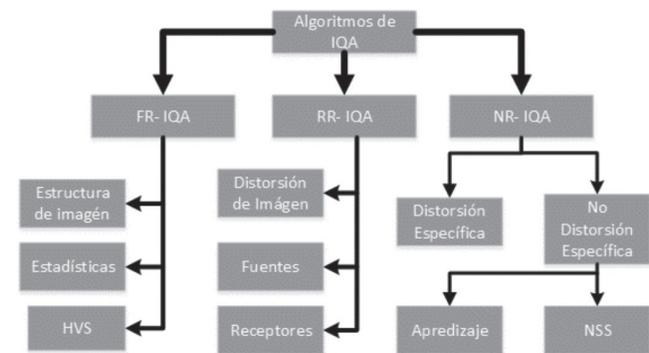


Fig. 4. Clasificación general de algoritmos de IQA Fuente: Tomada y modificada de [33]

Son muchos los trabajos desarrollados sobre metodología para evaluar la calidad del video en un servicio multimedia; a continuación se presentan algunos de ellos: en [34] se describe la evolución de técnicas de medidas de calidad de video, iniciando por métricas PSNR hasta métricas híbridas. En [29] se presenta un análisis documentado de trabajos propuestos por diferentes autores sobre cómo medir QoE

para el servicio de televisión sobre protocolo IP (IPTV). En [19] se revisan las metodologías actuales utilizadas para evaluar la QoE en un servicio de streaming de vídeo. En [21] se presenta la pérdida de paquetes como un candidato entre varios parámetros de QoS que pueden afectar la QoE del servicio de streaming de vídeo. En [25] se introduce un esquema de clasificación de métodos objetivos para la evaluación de la calidad de vídeo con referencia completa y reducida, donde la clasificación se realiza inicialmente partiendo de considerar características visuales naturales (sistema visual humano) o características perceptivas. En [35] se analiza y evalúa el desempeño de QoS para la transmisión de voz y vídeo a través de redes 3G / UMTS basado en algunos de los parámetros de calidad de servicio, tales como la pérdida de paquetes, retardo, throughput y jitter. En [36] se enfoca el análisis de calidad QoS de servicios de Voz y Vídeo y la predicción de QoE usando técnicas de minería de datos; adicionalmente se presentan los indicadores de desempeño clave (Key Performance Indicator-KPI's) para calidad de servicio QoS en redes GSM, UMTS y LTE. En [37] se presenta un novedoso método para el análisis de la influencia de la capa física sobre el desempeño de QoS y QoE en un servicio IPTV en tiempo real. En [22] se propone una fórmula genérica en la que los parámetros de QoE y QoS están relacionados a través de una función llamada hipótesis IQX (exponential interdependency of quality of experience and quality of service). En [38] se presenta una visión general de las relaciones fundamentales existentes entre QoE y QoS, formuladas como ecuaciones diferenciales parciales, que describen los cambios en la QoE con respecto a parámetros específicos de QoS. En [39] se presenta el manejo de la QoE enfocada a la optimización de múltiples fuentes de usuarios con Streaming Adaptativo Dinámico sobre HTTP-DASH para redes inalámbricas de próxima generación. En [33] y [28] se presenta una clasificación y revisión de los últimos trabajos de investigación publicados en el área de la evaluación y calidad de imagen de vídeo sin referencia NR(Null Reference), los cuales se aplican en servicios de tiempo real; en [26] se presenta una esquema de evaluación de calidad de imagen con referencia completa, que utiliza el gradiente de similitud y la medida distorsionada de pixel. En [40] se presenta un marco³ de gestión de QoE genérico de punto de acceso a red para el servicio de vídeo, el cual se aplica a un amplio rango de sistemas de telecomunicaciones modernos. En [20] se propone una nueva arquitectura para proporcionar calidad de experiencia (QoE) en redes de operadores móviles; en particular se describe una posible arquitectura para el control de recursos manejado por QoE en redes LTE y LTE avanzada. En [41] se muestra una visión general de las metodologías subjetivas y objetivas existentes para la evaluación de la QoE en conversaciones de voz. Además se describen procedimientos prácticos para la medición de QoE en VoIP; igualmente se plantea que la QoS deben ser evaluada de acuerdo a la QoE, en lugar de los clásicos indicadores orientados a redes, tales como el retardo, la disponibilidad, la respuesta de tiempo, jitter y la pérdida

de paquetes. En [42] se enfoca en identificar indicadores de desempeño claves (KPI) para redes de acceso de radio (RAN) que afectan la voz y la calidad del vídeo en comunicaciones multimedia en entornos inalámbricos, además de estimar la QoE de un usuario final usando técnicas basadas en lógica difusa. Adicionalmente se determina mediante una expresión matemática cómo la calidad de un archivo de vídeo se puede calcular de la estimación individual de la calidad de audio y de la calidad del vídeo puro.

IV. STREAMING DE VIDEO Y AMBIENTES DE EMULACIÓN SOBRE LTE

El grupo de trabajo 3GPP (3rd Generation Partnership Project) se introduce para mejorar las redes móviles existentes, el cual desde sus inicios progresivamente ha ido incorporando mejoras, las cuales son la respuesta al aumento de tráfico de vídeo en redes móviles y frente a lo cual los usuarios móviles esperan una experiencia de vídeo de alta calidad[7]. Las bases y especificaciones de LTE se consignan en el documento 3GPP Release-8 a finales del año 2008[43]. 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 [44]; 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. La especificación técnica 3GPP TS 26.234 v12.5.0 Release 12 [45] definida como LTE Advanced de diciembre de 2014 (PSS Codecs y Protocolos) en la cláusula 12 especifica el Streaming Adaptativo Dinámico sobre HTTP (3GPP-DASH) como el mecanismo adoptado de streaming adaptativo HTTP; el anterior se define en 3GPP TS 26.247 Release 13 [46]. Adicionalmente el Release 12 en la cláusula 11 define la QoE, especificando que las métricas de QoE de la PSS son opcionales tanto para los servidores de PSS y para los clientes, además de que no podrán perturbar los servicios de la PSS. 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 CDN, reutilización de servidores HTTP y caches, reutilización de motores de reproducción de medios existentes, soporte para entrega de servicios bajo demanda, ya sea en vivo o desplazados en tiempo, así como simplicidad para una amplia adopción. 3GPP también ha buscado la alineación con otras organizaciones y foros de la industria que trabajan en el área de distribución de vídeo, como por ejemplo, el Foro IPTV Open (OIPF) que se basa en Streaming Adaptativo HTTP (HAS) sobre 3GPP [47].

Como se mencionó anteriormente, la cobertura en LTE se encuentra en aumento y de acuerdo a los pronósticos se convertirá en el primer estándar de redes móviles verdaderamente global [6]. El constante desarrollo y potencial de LTE permitirá dar soporte al crecimiento del tráfico de usuarios móviles. El éxito de LTE ha sido el de establecer una red que pueda proporcionar altas tasas de datos para el esperado incremento exponencial en el tráfico de red y configurar las bases para la construcción de los estándares del

³Referido en artículos de habla inglesa como: framework

futuro. En la actualidad las empresas de telecomunicaciones están realizando un balance de inversión en infraestructura que permita proporcionar servicios satisfactorios requeridos por los usuarios. Uno de los inconvenientes que ha frenado el despliegue de LTE radica en que no es compatible con 2G y 3G; por lo tanto se debe crear una RAN para superponer nuevos equipos de LTE sobre infraestructura existente. Por otro lado, debido a que el desarrollo de servicios y aplicaciones de LTE han obedecido a las necesidades de los usuarios, ¿Qué sucede en regiones en las cuales aún no se ha desplegado la mencionada tecnología?, ¿Cómo pueden los diseñadores desarrollar prototipos y probar sus desarrollos? En la solución a los anteriores cuestionamientos se crea la necesidad de generar un mecanismo que permita desarrollar entornos de emulación para ambientes LTE, donde los servicios sean reales y la parte de red sea simulada, permitiendo evaluar el tráfico real del servicio sin requerir de una infraestructura real de red. Así, se podrán construir generadores de carga que simulen el comportamiento de un número elevado de clientes, accediendo a través de la red simulada a servidores reales de vídeo. En este tipo de escenario es posible validar el rendimiento real del servicio en diferentes entornos de red y compitiendo tanto con cargas de tráfico simulado como con otros tipos de tráfico real procedentes de otras aplicaciones [48].

Apesar de que ya hay un lanzamiento mundial significativo de LTE, hay poco conocimiento del comportamiento de uso y las características de tráfico de los dispositivos móviles LTE. Para mejorar el desempeño de las redes inalámbricas actuales, es crucial identificar las características del tráfico de los servicios que soportan, con el fin de mejorar o diseñar nuevas capas técnicas PHY y MAC [1]. Sin embargo, a pesar de su gran potencial, LTE está aún en sus etapas tempranas. Se debe realizar un gran esfuerzo para identificar áreas que requieren mejoras. Las medidas de tráfico son formas eficaces para determinar qué tan bien se están desempeñando un protocolo o una aplicación en un ambiente inalámbrico. Utilizando este análisis detallado de la medición de red, se identificarán los cuellos de botella de rendimiento de LTE. Aunque hay modelos matemáticos que permiten estudiar e identificar los cuellos de botella de rendimiento para LTE, carecen de la fuerza de la realidad de las condiciones reales [1]. Como respuesta a la anterior situación, en la actualidad hay un marcado interés en el uso y desarrollo de plataformas de prueba que reúnan requerimientos actuales y futuros de funcionamiento. En la literatura, se proponen algunas plataformas y soluciones comerciales que permiten probar diferentes situaciones y configuraciones de aplicaciones de streaming de vídeo, entre las cuales se tienen medidas de ancho de banda, recursos de comunicaciones y QoS [49], [50], [51]. Entre las plataformas de simulación más utilizadas para este tipo de mediciones se encuentran: OPNET Modeler [52], OMNET++[53], NS-2[54] y NS-3[55]. A continuación se presentan algunos trabajos enfocados en esta temática. En [6] se presenta una novedosa metodología para extender simulaciones de NS3 a emulaciones en tiempo real sobre el módulo LTE y comparar su rendimiento con escenarios puramente simulados para validar su uso. En [9] se presenta

una plataforma de emulación en tiempo real basada en NS3, desarrollada para evaluar y optimizar el desempeño de las redes LTE, la plataforma es compatible con los protocolos de comunicación de una sola vía como UDP / RTP, además de los protocolos de comunicación de dos vías como HTTP y DASH. Otras simulaciones realizadas con NS3 se presentan en [56] y [57]; en [58] se discuten las desventajas de utilizar una única máquina para realizar las emulaciones y se presenta una arquitectura distribuida para emulaciones con NS3. La ventaja de trabajar con NS3 es la posibilidad de utilizar el módulo LENA, el cual es un simulador de red de código abierto orientado al producto LTE / EPC que permite a los investigadores y pequeños desarrolladores diseñar y probar algoritmos y soluciones [59]. En [60]”page”:"902-905”,”source”:"IEEE Xplore”,”event”:"2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT se plantea una arquitectura para estudiar la Política y Control de Carga PCC en una EPC (Evolved Packet Core) y luego se simular la arquitectura PCC de redes LTE basados en la plataforma de simulación OPNET. Mediante el uso de USRP (Universal Software Radio Peripheral), que es un dispositivo que puede actuar como dispositivo final de radiofrecuencia y puede ser ajustado usando GNU Radio [61], se han desarrollado pocas aplicaciones; en [62] se presenta una solución propietaria desarrollada por Fabrice Bellard, la cual no es de código abierto y es comercializada por Amarisoft [63]; además es limitada por el intervalo RF de la USRP empleada y no se encuentra integrada con ningún simulador de red. La Tabla I presenta las principales plataformas utilizadas en la simulación de redes inalámbricas, especificando la posibilidad de utilización como emuladores para el servicio de streaming de vídeo en la arquitectura de LTE.

TABLA I
SIMULADORES DE RED

Simulador	Tipo de licencia	Emulación en tiempo Real	Streaming de vídeo	Soporte para LTE
OPNET Modeler	Comercial	SI	SI	SI
OMNET++	Abierta	SI	SI	Limitado
NS-3	Abierta	SI	SI	SI - LENA
Packet Tracer	Comercial	NO	NO	NO
GloMoSim	Comercial	SI	SI	NO
NetSim	Comercial	NO	SI	Limitado

V. TRABAJOS FUTUROS

El mejoramiento y adecuación de tecnologías de red de acceso de radio – RAN es de vital importancia para permitir que los pronósticos de tráfico de usuarios inalámbricos puedan ser atendidos dentro de unos parámetros de QoE y QoS aceptables; es por eso, que se hace necesario realizar estudios enfocados a encontrar modelos de tráfico de diferentes tipos de servicio, principalmente los de vídeo, por requerir mayor ancho de banda. Adicional a lo anterior, se requiere que los modelos encontrados partan de mediciones

en ambientes reales; es aquí donde los sistemas de emulación adquieren una gran importancia. La combinación estratégica de simuladores de redes con dispositivos reales permitirá generar modelos de tráfico mucho más ajustados a la realidad y se constituirá en una herramienta vital para que los diseñadores y planificadores de red puedan tomar las medidas necesarias que permitan brindar un mejor servicio a los usuarios en cuanto a QoE. Actualmente los autores del presente artículo se encuentran desarrollando el modelado de tráfico del servicio de video en vivo mediante la emulación del sistema LTE a partir de servidores reales de streaming de video con el simulador NS3 y la plataforma Software Defined Radio – SDR mediante el uso de Universal Software Radio Peripheral - USRP, lo cual permitirá obtener mediciones más reales al no considerar dentro del entorno de simulación. La definición del canal de radio mediante los modelos probabilísticos aceptados por la comunidad científica y por los organismos de estandarización, permitirá generar un modelo más aproximado a la realidad y que parte de condiciones reales del canal inalámbrico.

VI. CONCLUSIONES

A pesar de los esfuerzos de los operadores y de las actuales investigaciones, es necesario que la tecnología LTE presente un mayor nivel de desarrollo orientado hacia las necesidades reales de los usuarios, ya que dicha tecnología es la llamada a convertirse en la principal RAN debido a que actualmente presenta las mejores condiciones para la prestación del servicio de video; además por sus características funcionales y con algunas mejoras en su desarrollo, permitirá soportar el abrumador crecimiento de tráfico pronosticado. Por lo anterior, los modelos de tráfico usados en sistemas de emulación de diferentes servicios juegan un papel determinante, lo cual le permitirá a la tecnología LTE alcanzar la cima de desarrollo apalancado por estudios reales de las verdaderas necesidades y comportamiento de los usuarios. El servicio de streaming de video (en vivo o bajo demanda) será uno de los servicios más importantes con un futuro prometedor debido a la popularización de los dispositivos móviles inteligentes. Por lo tanto, se deben asegurar mediciones reales de QoE que permitan a los operadores de red redimensionar y ajustar sus redes con el objetivo de proporcionar las condiciones necesarias y suficientes para que los usuarios puedan disfrutar del mencionado servicio con un alto grado de satisfacción.

REFERENCIAS

- [1] S. Fowler, et al. "Evaluation and prospects from a measurement campaign on real multimedia traffic in LTE vs. UMTS", in *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)*, 2014 4th International Conference on, Aalborg, 2014, pp. 1-5.
- [2] A. Lombardo, C. Panarello, and G. Schembra, "A Model-Assisted Cross-Layer Design of an Energy-Efficient Mobile Video Cloud", *Multimed. IEEE Trans. On*, vol. 16, n.º 8, pp. 2307-2322, dic. 2014.
- [3] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014–2019 White Paper", Cisco, 03-feb-2015. [En línea]. Disponible en: http://cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html. [Accedido: 08-sep-2015].
- [4] Ericsson, "Ericsson Mobility Report June 2015", jun. 2015.
- [5] C. N. Pitas, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, "Speech and Video Telephony Quality Characterization and Prediction of Live Contemporary Mobile Communication Networks", *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 69, n.º 1, pp. 153-174, mar. 2012.
- [6] T. Molloy, Z. Yuan, and G.-M. Muntean, "Real time emulation of an LTE network using NS-3", in *25th IET Irish Signals Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies (ISSC 2014/CIICT 2014)*, Limerick, 2014, pp. 251-257.
- [7] T. Stockhammer, "Dynamic adaptive streaming over HTTP: standards and design principles", in *Proceedings of the second annual ACM conference on Multimedia systems*, Munich, Germany, 2011, pp. 133-144.
- [8] F. J. Rivas, A. Az, and P. Merino, "Obtaining More Realistic Cross-Layer QoS Measurements: A VoIP over LTE Use Case", *J. Comput. Netw. Commun.*, vol. 2013, pp. 1-10, ago. 2013.
- [9] F. Abdurrahman, et al. "Real Time Video Streaming over NS3 based Emulated LTE Networks", in *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT)*, 2014, vol. 4, pp. 659-663.
- [10] F. Pianese, J. Keller, and E. W. Biersack, "PULSE, a Flexible P2P Live Streaming System", in *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications*. Proceedings, 2006, pp. 1-6.
- [11] D. Ho y H. Song, "Networking cost effective video streaming system over heterogeneous wireless networks", in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium*, London, 2013, pp. 3589-3593.
- [12] T. Chen, Y. D. and Khalili, R., "MSPlayer: Multi-Source and multi-Path leverAged Youtuber", in *CoNEXT 2014 - Proc. 2014 Conf. Emerg. Netw. Exp. Technol.*, pp. 263-269, 2014.
- [13] D. Munaretto, F. Giust, G. Kunzmann, and M. Zorzi, "Performance analysis of dynamic adaptive video streaming over mobile content delivery networks", in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, NSW, 2014, pp. 1053-1058.
- [14] Y. Guan, Y. Xiao, L. J. Cimini, y C.-C. Shen, "Power efficient peer-to-peer streaming to co-located mobile users", in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2014 IEEE 11th*, Las Vegas, NV, 2014, pp. 321-326.
- [15] L. Zhang, et al., "Green and Cooperative DASH in Wireless D2D Networks", *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 84, n.º 3, pp. 1797-1816, may 2015.
- [16] ITU-T Recommendation Y.1901, "Requirements for the Support of IPTV Services", 2009.
- [17] ITU-T Recommendation E.800, "Definitions of Terms Related to Quality of Service", 2008.
- [18] IETF RFC 2386, "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", 1998.
- [19] O. B. Maia, H. C. Yehia, and L. de Errico, "A concise review of the quality of experience assessment for video streaming", *Comput. Commun.*, vol. 57, pp. 1-12, feb. 2015.
- [20] G. Gómez, J. Lorca, R. García, and Q. Pérez, "Towards a QoE-Driven Resource Control in LTE and LTE-A Networks", *J. Comput. Netw. Commun. J. Comput. Netw. Commun.*, vol. 2013, 2013, ene. 2013.
- [21] S. Khorsandroo, R. M. Noor, and S. Khorsandroo, "A generic quantitative relationship between quality of experience and packet loss in video streaming services", in *2012 Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Phuket, 2012, pp. 352-356.
- [22] M. Fiedler, T. Hossfeld, and P. Tran-Gia, "A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service", *IEEE Netw.*, vol. 24, n.º 2, pp. 36-41, mar. 2010.
- [23] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [24] L. Guo and Y. Meng, "What is wrong and right with MSE?", in *Proc. 8th Int. Conf. Signal Image Process.* 2006, pp. 212-215.
- [25] S. Chikkerur, V. Sundaram, M. Reisslein, and L. J. Karam, "Objective Video Quality Assessment Methods: A Classification, Review, and Performance Comparison", *Broadcast. IEEE Trans. On*, vol. 57, n.º 2, pp. 165-182, jun. 2011.

- [26] Z. A. Seghir and F. Hachouf, "Full-Reference Image Quality Assessment Scheme Based on Deformed Pixel and Gradient Similarity", *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* DOI 10.1016/j.ijleo.2015.08.132
- [27] R. Hong, et al., "Image quality assessment based on matching pursuit", *Inf. Sci.*, vol. 273, pp. 196-211, jul. 2014.
- [28] R. A. Manap y L. Shao, "Non-distortion-specific no-reference image quality assessment: A survey", *Inf. Sci.*, vol. 301, pp. 141-160, abr. 2015.
- [29] J. C. Cuéllar, J. H. Ortiz, and J. L. Arciniegas, "Clasificación y Análisis de Métodos para medir Calidad de la Experiencia del Servicio de Televisión sobre Protocolo IP (IPTV)", *Inf. Tecnológica*, vol. 25, n.º 5, pp. 121-128, 2014.
- [30] M. Rohani, A. N. Avnani, S. Nader-Esfahani, and M. Bashirpour, "A Reduced Reference Video Quality Assessment method based on the human motion perception", in *Telecommunications (IST)*, 2010 5th International Symposium on, 2010, pp. 831-835.
- [31] A. Rehman and Z. Wang, "Reduced-Reference Image Quality Assessment by Structural Similarity Estimation", *Image Process. IEEE Trans. On*, vol. 21, n.º 8, pp. 3378-3389, ago. 2012.
- [32] L. Ma, S. Li, F. Zhang, and K. N. Ngan, "Reduced-Reference Image Quality Assessment Using Reorganized DCT-Based Image Representation", *Multimed. IEEE Trans. On*, vol. 13, n.º 4, pp. 824-829, ago. 2011.
- [33] M. Shahid, A. Rossholm, B. Löfström, and H.-J. Zepernick, "No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches", *EURASIP J. Image Video Process.*, vol. 2014, n.º 1, p. 40, ago. 2014.
- [34] S. Winkler and P. Mohandas, "The Evolution of Video Quality Measurement: From PSNR to Hybrid Metrics", *Broadcast. IEEE Trans. On*, vol. 54, n.º 3, pp. 660-668, sep. 2008.
- [35] I. AL and O. S. AJAYI, "Evaluation of Video Quality of Service in 3G/UMTS Wireless Networks as Succor for B3G/4G Wireless Network", Master Thesis in Electrical Engineering with Emphasis on Telecommunications, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona Sweden, 2010.
- [36] C. N. Pitas, and D. Panagopoulos, "Quality of Consumer Experience Data Mining for Mobile Multimedia Communication Networks: Learning from Measurements Campaign", *Int. J. Wirel. Mob. Comput.*, vol. 8, n.º 1, 2014.
- [37] N. Goran, M. Hadžialić, and A. Begović, "Real time assuring QoE in the lowest OSI/ISO layers during delivering of IPTV services", in *2014 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, 2014, pp. 532-535.
- [38] M. Fiedler and T. Hossfeld, "Quality of Experience-Related Differential Equations and Provisioning-Delivery Hysteresis", in *The 21st International Teletraffic Congress Specialist Seminar on Multimedia Applications - Traffic, Performance and QoE*, Miyazaki, Japan., 2010, pp. 1-6.
- [39] A. El Essaili, et al., "Quality-of-experience driven adaptive HTTP media delivery", in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference*, Budapest, 2013, pp. 2480-2485.
- [40] J. Seppänen, M. Varela, and A. Sgora, "An autonomous QoE-driven network management framework", *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 25, n.º 3, pp. 565-577, abr. 2014.
- [41] S. Jelassi, et al., "Quality of Experience of VoIP Service: A Survey of Assessment Approaches and Open Issues", *Commun. Surv. Amp Tutor. IEEE*, vol. 14, n.º 2, pp. 491-513, Second Quarter 2012.
- [42] C. N. Pitas, D. E. Charilas, A. D. Panagopoulos, and P. Constantinou, "Adaptive neuro-fuzzy inference models for speech and video quality prediction in real-world mobile communication networks", *Wirel. Commun. IEEE*, vol. 20, n.º 3, pp. 80-88, jun. 2013.
- [43] The Mobile Broadband Standard, 3GPP a Global Initiative, "Release 8". [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [44] The Mobile Broadband Standard, 3GPP a Global Initiative, Release 9. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [45] The Mobile Broadband Standard, 3GPP a Global Initiative, Release 12. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/68-release-12>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [46] The Mobile Broadband Standard, 3GPP a Global Initiative, Release 13. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/release-13>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [47] Open IPTV Forum, "Release 2 Specification, HTTP Adaptive Streaming", V2.0, September 2010.
- [48] W. Y. Campo, J. L. Arciniegas, R. García, and D. Melendi, "Análisis de Tráfico para un Servicio de Video bajo Demanda sobre Redes HFC usando el Protocolo RTMP", *Inf. Tecnológica*, vol. 21, n.º 6, pp. 37-48, 2010.
- [49] M. Montagud, F. Boronat, and V. Vidal, "Simulation platform for video streaming evaluation", in *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2010 International Conference on, 2010, pp. 397-401.
- [50] D. Buğdaycı, E. Zerman, and G. B. Akar, "Real time streaming of 3D video from embedded platforms to mobile devices", in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2012 20th, 2012, pp. 1-4.
- [51] D. T. Massandy and I. R. Munir, "Secured video streaming development on smartphones with Android platform", in *Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, 2012 7th International Conference on, 2012, pp. 339-344.
- [52] OPNET. [En línea]. Disponible en: <http://www.riverbed.com/products/steelcentral/opnet.html?redirect=opnet>. [Accedido: 28-oct-2015].
- [53] OMNeT++ Discrete Event Simulator - Home. [En línea]. Disponible en: <https://omnetpp.org/>. [Accedido: 28-oct-2015].
- [54] The Network Simulator - ns-2. [En línea]. Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Accedido: 28-oct-2015].
- [55] NS-3. [En línea]. Disponible en: <https://www.nsnam.org/>. [Accedido: 28-oct-2015].
- [56] LTE-Sim. [En línea]. Disponible en: <http://telematics.poliba.it/index.php/en/lte-sim>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [57] F. Guidolin, L. Badia, and M. Zorzi, "Implementation of 2x2 MIMO in an LTE module for the ns3 simulator", in *Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2012 IEEE 17th International Workshop on, Barcelona, 2012, pp. 281-285.
- [58] A. Alvarez, R. et al., "Limitations of network emulation with single-machine and distributed ns-3", in *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2010, p. 67.
- [59] LENA. [En línea]. Disponible en: <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [60] G. Xu, G. Lu, and Y. Liu, "Simulating the PCC architecture of LTE networks in OPNET", in *2013 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, Dalian, 2013, pp. 902-905.
- [61] GNURadio, "GNU Radio wiki - gnuradio.org". [En línea]. Disponible en: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [62] F. Bellard, "LTE Base Station Software", *Fabrice Bellards website*. [En línea]. Disponible en: <http://bellard.org/lte/>. [Accedido: 20-oct-2015].
- [63] "Amarisoft". [En línea]. Disponible en: <http://www.amarisoft.com/?p=amarilte>. [Accedido: 20-oct-2015].



Héctor Fabio Bermúdez O. Ingeniero en Electrónica de la Universidad del Cauca (2000). Magister en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca (2010). Actualmente estudiante de Doctorado en Ingeniería Telemática. Profesor Asociado en la Universidad del Quindío, programa de Ingeniería Electrónica, Coordinador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sistemas radiantes y propagación, modelado de tráfico de servicios telemáticos.



José Luis Arciniegas Herrera. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Especialista en Redes y Servicios Telemáticos, Doctor en Ingeniería de Sistemas Telemáticos. Actualmente Profesor titular de la Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Sus áreas de interés son: Arquitecturas del Software, Televisión digital interactiva, Calidad del producto Software, Mejora de procesos de desarrollo software y Calidad de la Experiencia



Evelio Astaiza Hoyos, Ingeniero en Electrónica de la Universidad del Cauca (1998). Magíster en Ingeniería, área de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca (2008). Actualmente candidato a Doctorado en ciencias de la Electrónica. Profesor Asociado en la Universidad del Quindío, programa de Ingeniería Electrónica, Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sensado de espectro.