



Estrategias de scheduling sobre QUIC en entornos NTN

Fátima Khan*, Fátima Fernández[†], Luis Diez*, Ramón Agüero*

*Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM), Universidad Cantabria
fatima.khan@unican.es, {ldiez,ramon}@tlmat.unican.es

[†]IoT and Digital Platforms Department, Ikerlan Technology Research Center
ffernandez@ikerlan.es

En este trabajo se realiza un análisis del rendimiento de los protocolos de transporte TCP y QUIC, sobre redes satelitales realistas, promoviendo una metodología innovadora que combina implementación real (técnicas de virtualización) y simulación para llevar a cabo experimentos sistemáticos y repetitivos. Con el objetivo de asegurar un análisis exhaustivo, se evalúan diferentes configuraciones, que incluyen cambios en la banda de operación y el tamaño del *buffer*. Además, se determina el impacto de la capacidad de gestionar múltiples flujos (multi-streaming) que integra QUIC. Se observa que QUIC ofrece retardos inferiores a los de TCP, aunque puede experimentar un mayor *jitter* en determinadas configuraciones. Los resultados obtenidos evidencian que el uso de múltiples flujos en QUIC no consigue una mejora significativa con el planificador por defecto, Round-Robin. Por lo tanto, se proponen estrategias de scheduling más adecuadas, capaces de obtener mejores resultados en situaciones de tráfico desequilibrado. Gracias a estas políticas, se concluye que el comportamiento de los protocolos de transporte en redes no terrestres no siempre es óptimo, y que QUIC puede aportar ventajas claras en comparación con TCP.

Palabras Clave—QUIC, LEO, Scheduling, LMS, TCP

I. INTRODUCCIÓN

Se espera que la presencia de las Non-Terrestrial Networks (NTN) en las próximas generaciones de comunicaciones celulares, redes 5G y Beyond 5G (B5G), sea notablemente más relevante que en sistemas anteriores. Así, estas redes se consideran elementos fundamentales de dichos despliegues, ya que permitirán proporcionar servicios de conectividad en zonas remotas (satélite) así como desplegar rápidamente recursos de comunicación en ubicaciones específicas, utilizando Unmanned Aerial Vehicle (UAV). En definitiva, el impacto de la integración de redes NTN en arquitecturas celulares más tradicionales conlleva beneficios en términos de fiabilidad, escalabilidad, cobertura y continuidad del servicio.

Sin embargo, estos beneficios también plantean varios desafíos. Por ejemplo, es bien conocido que los protocolos de transporte tradicionales, especialmente Transmission Control Protocol (TCP), presentan un rendimiento deficiente en los enlaces inalámbricos. Se espera que esto se acentúe con la llegada de la tecnología 5G y los sistemas B5G, incluyendo las NTN [1]. Además, los protocolos de transporte tradicionales no se comportan de manera óptima con los patrones de tráfico característicos de los nuevos servicios.

Para hacer frente a las deficiencias mencionadas, la comunidad científica está trabajando en el diseño y desarrollo de nuevos protocolos de transporte que puedan superar algunas de las limitaciones que presenta TCP. Una de las alternativas más relevantes es el protocolo Quick UDP Internet Connections (QUIC), promovido originalmente por Google, y que ha sido estandarizado recientemente [2]. Entre sus ventajas, se puede destacar que habilita la gestión de múltiples flujos (multi-streaming), lo que evita el bloqueo Head-of-line (HOL), producido en TCP por una pérdida que, a pesar de afectar a un flujo concreto, afecta al resto de los que estén activos.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema, surgen algoritmos de *scheduling* (planificación) para gestionar los recursos, aumentando el rendimiento y reduciendo el retardo. El mecanismo de planificación decide el flujo del que se extrae información para construir un paquete QUIC. El funcionamiento por defecto del protocolo QUIC es la estrategia Round-Robin (RR), en la que el reparto de la información en los paquetes es equitativo para cada flujo, utilizando siempre el mismo orden, por lo que los flujos se gestionan sin ningún tipo de prioridad.

En definitiva, en este trabajo se evalúa la combinación de QUIC y NTN y, en particular, se estudian las prestaciones de este protocolo de transporte sobre comunicaciones Low Earth Orbit (LEO). Se hace uso de una metodología novedosa, que permite imitar el comportamiento de los enlaces inalámbricos que caracterizan

la conectividad subyacente. Gracias a ella se extraen conclusiones sobre el rendimiento de protocolos de transporte sobre estas redes. En primer lugar, se comparan las prestaciones de QUIC con las de TCP y, a continuación, se estudia el comportamiento de diferentes estrategias de scheduling, con el fin de conocer las posibles ventajas que podrían aportar.

Las principales contribuciones de este trabajo son las que se enumeran a continuación:

- 1) Evaluación del rendimiento de la capacidad de transmisión multi-streaming de QUIC sobre canales inalámbricos muy variables (NTN).
- 2) Propuesta de políticas de scheduling basadas en la teoría de control dinámico de colas, que tienen como objetivo ajustar el retardo de flujos de tráfico heterogéneos.
- 3) Uso de una metodología que combina implementaciones reales de protocolos (técnicas de virtualización) con plataformas de simulación, imitando con precisión las características de la conectividad subyacente, lo que permite realizar experimentos sistemáticos.
- 4) Evaluación del rendimiento de los esquemas propuestos en comparación con alternativas más tradicionales. Los resultados muestran que los planificadores propuestos armonizan el retardo sufrido por flujos de tráfico heterogéneos, sin perjudicar el rendimiento, incluso en escenarios saturados.

El resto del documento está estructurado como se indica: en la Sección II se describen los trabajos relacionados, identificando las principales diferencias con el que se presenta en el artículo. La Sección III describe el modelo del sistema que se propone, que permite integrar esquemas de scheduling novedosos, basados en el retardo. La Sección IV introduce la metodología utilizada para evaluar el rendimiento del protocolo QUIC y las estrategias de scheduling propuestas, así como el escenario sobre el que se realizarán los experimentos, mientras que los resultados se describen en la Sección V. Finalmente, la Sección VI concluye el artículo, e introduce líneas de investigación futuras que surgen a partir de este trabajo.

II. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años ha aumentado notablemente el interés por las comunicaciones NTN, en general, y LEO, en particular. Una de las principales causas en su posible uso como tecnología habilitadora para redes 5G y B5G [3], [4]. Liu *et al.* introducen una Satellite Access Network (SAN), prestando mayor atención a las nuevas líneas de investigación que surgen a partir de este paradigma de comunicación [5]. Más allá de las propuestas que se han realizado para las arquitecturas subyacentes, existen trabajos que analizan la convergencia de redes terrestres y no terrestres. En este sentido, Leyva-Mayorga *et al.* proporcionan una visión general de la integración de conectividad basada en satélites LEO en la red de acceso 5G/B5G, centrándose en caracterizar los enlaces físicos de la SAN resultante [6].

Los organismos de estandarización también han empezado a considerar las comunicaciones por satélite como elemento fundamental de las redes B5G. En [7] se analiza la integración de NTN y tecnologías 5G. El trabajo introduce la estrategia de estandarización del 3rd Generation Partnership Project (3GPP), y presenta los principales retos que surgen: (1) elección de arquitectura; (2) técnicas de gestión de red; y (3) modificaciones necesarias en los terminales de los usuarios. Del mismo modo, Darwish *et al.* estudian la deficiencia de la red de acceso basada en LEO por parte de los organismos de estandarización, prestando especial atención a las normas 3GPP NR [8]. También hay trabajos que proponen diferentes soluciones y técnicas especialmente concebidas para redes de acceso basadas en LEO. Así, los autores de [9] proponen una solución de scheduling en enlaces ascendentes, para servicios Massive Machine-Type Communications (mMTC)-Narrow Band IoT (NB-IoT) soportados por constelaciones LEO. No requiere modificaciones en los dispositivos NB-IoT, y reduce el desplazamiento Doppler diferencial.

Los trabajos mencionados anteriormente sientan las bases del uso de satélites LEO para la provisión de servicios en 5G/B5G. En este contexto, un segundo grupo de trabajos se centra en las capacidades de SAN en general, y LEO en particular, para habilitar servicios de computación en el *edge*/nube asistidos por satélite.

Xie *et al.* ofrece una visión general de Satellite-Terrestrial integrated Edge Computing Networks (STECN), que combina las redes satelitales-terrestres con la computación en el *edge* para mejorar la Quality of Service (QoS) [10]. El documento analiza los principios de diseño, las funcionalidades clave, así como algunos retos de este enfoque. En la misma línea, los autores de [11] proponen la combinación de Mobile Edge Computing (MEC) con LEO, promoviendo la denominada LEO Satellite Edge Computing (LSEC), e investigan la asignación de recursos para la descarga de computación en la red LSEC.

Otros trabajos asumen una integración total de los satélites y las redes terrestres existentes. Este es el caso de [12], que considera una topología con estaciones base y pequeñas células basadas en LEO, así como enlaces de backhaul terrestres y satelitales. Sobre dicha topología, se formula un problema de optimización para minimizar el consumo energético de toda la red, manteniendo los requisitos de QoS. Aunque estos trabajos comparten el marco de aplicación con el que se presenta en este documento, el objetivo es diferente, por lo que la contribución que aquí se presenta es complementaria.

En ese sentido, este trabajo se centra en la evaluación del rendimiento de protocolos de transporte tradicionales (TCP) y emergentes (QUIC) sobre estas redes. Para contextualizar esta línea de investigación, se indican a continuación algunos trabajos que han estudiado el comportamiento de QUIC, comparándolo con TCP.

Shreedhar *et al.* evalúan el rendimiento obtenido con QUIC utilizando tráfico web, y servicios de almacenamiento en la nube y vídeo en entornos no controla-

dos [13]. Sin embargo, no prestan mucha atención a la red de acceso subyacente. Del mismo modo, Qian *et al.* analizan el rendimiento de QUIC en redes de acceso LTE Advanced (LTE-A) [14]. Los autores estudian el comportamiento de diferentes algoritmos de control de congestión, y amplían la operación habitual de QUIC, aprovechando su funcionalidad multi-camino, a través de un prototipo que permite comunicaciones duales WiFi y LTE-A. Más cerca del escenario de computación en el *edge*nube, Dizdarević y Jukan evalúan el rendimiento de QUIC para el continuo IoT-*edge*-nube [15]. La evaluación se basa en dos escenarios diferentes: (1) IoT-*edge*, y (2) IoT-*edge*-cloud. El análisis, que utiliza dispositivos Raspberry Pi, se centra en la arquitectura de la nube, mientras que se presta poca atención a la red de acceso.

Como se puede observar, no existen trabajos que hayan afrontado la evaluación de protocolos de transporte en general, y de QUIC en particular, sobre SAN y, más concretamente, sobre escenarios que integran redes terrestres y no terrestres.

En el pasado, Tsonuda *et al.* analizan el rendimiento de Stream Control Transmission Protocol (SCTP) sobre redes LEO utilizando multi-stream adaptativo [16]. Además, la característica multi-homing de SCTP también se utilizó sobre redes LEO para mejorar los trasposos [17]. Respecto a QUIC, Yang *et al.* abordan la interacción entre redes LEO y QUIC, pero desde una perspectiva diferente [18]. Se centran en Multi-Path QUIC (MPQUIC), y proponen un modelo de rendimiento para LEO (traspaso, interrupción, etc.).

Martin y Khademi analizan la idoneidad del control de congestión Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time (BBR), utilizando QUIC, sobre redes Geostationary Equatorial Orbit (GEO) SATCOM [19]. Así, estudian el comportamiento de la combinación de QUIC y BBR sobre enlaces satelitales en órbita geostacionaria.

El estudio que parece más cercano al que aquí se presenta, es el trabajo de Yang, Li y Wu [20]. Modelan el canal inalámbrico con Matlab Satellite Tool Kit (STK) y utilizan las trazas correspondientes para analizar el rendimiento de QUIC sobre constelaciones LEO. También emplean la emulación sobre dispositivos reales, pero utilizan enlaces cableados de alta capacidad, cuyas características (retardo y tasa de pérdida) se modifican estadísticamente en base a los resultados previos. La diferencia con el enfoque de evaluación que aquí se propone es significativa, ya que: (1) no tienen en cuenta la longitud del *buffer* en los dispositivos, por lo que no consideran el retardo correspondiente; (2) en este trabajo se asume que las pérdidas son consecuencia directa de las fluctuaciones en la capacidad del canal, causando saturación de los *buffer* en los diferentes enlaces; (3) los autores de [20] usan archivos pequeños (páginas web de unas decenas de kB), mientras que en este trabajo se contemplan flujos de mayor duración, a partir del envío de archivos grandes; (4) los experimentos realizados en este trabajo tienen en cuenta además la capacidad del canal, permitiendo evaluar así el impacto de la carga de tráfico (tasa de aplicación).

Por último, cabe mencionar que ninguno de los trabajos analizados aborda realmente el estudio de las técnicas de scheduling para orquestar la funcionalidad multi-stream de QUIC. Existen pocos trabajos que se hayan centrado en el scheduling, pero lo han hecho siempre en el ámbito de las comunicaciones multi-camino, no como medio para gestionar los múltiples *streams* que una conexión QUIC puede gestionar [21], [22].

En definitiva, este trabajo cubre dos aspectos que no han sido tratados hasta ahora por la comunidad científica: (1) la evaluación de protocolos de capa de transporte, en particular QUIC, sobre nuevas topologías de red de acceso, abarcando constelaciones de satélites; y (2) el análisis de técnicas de scheduling que aproveche la capacidad que proporciona QUIC de gestionar varios flujos (*streams*) de manera simultánea.

III. MODELO DEL SISTEMA

En esta sección se procede a la explicación de las estrategias propuestas así como las soluciones de referencia. Con este objetivo se modifica el funcionamiento del planificador incluido por defecto en la implementación de QUIC que se utiliza en los experimentos, RR. Esta estrategia selecciona secuencialmente uno de los flujos activos en cada oportunidad de transmisión. Inicialmente se han implementado Fair Queuing (FQ) y Weighted Fair Queuing (WFQ), con fines comparativos. Con FQ, se distribuyen equitativamente la capacidad compartida entre los flujos activos y, siempre que se satisface la necesidad de uno, el excedente se vuelve a repartir equitativamente entre el resto. En WFQ el comportamiento es similar, pero en este caso, la capacidad se distribuye en función de ciertos pesos, que se utilizan para priorizar determinados flujos, asignándoles más recursos.

Estos tres planificadores tienen algunas limitaciones. Por un lado, RR y FQ gestionan todos los flujos por igual, y no permiten, por tanto, establecer prioridades. Por otro lado, WFQ es capaz de asignar cierta priorización, pero los pesos deben establecerse a priori, por lo que no podría adaptarse a las variaciones del canal o del tráfico.

Para superar esta limitación, se propone un planificador Back Pressure (BP), basado en la teoría de Lyapunov [23]. Esta política pretende garantizar la estabilidad de las colas de cada flujo para cualquier condición de tráfico y canal, siempre que se respete la capacidad promedio. Cabe destacar que, a diferencia de WFQ, la solución propuesta no requiere ninguna configuración previa.

La estrategia de scheduling entre los flujos activos se modela como un sistema de colas. $Q_k(t)$ corresponde a la ocupación del *buffer* de aplicación para el flujo k -ésimo, en cualquier momento t , mientras que la decisión del scheduling para ese flujo se define como $\alpha_k(t)$. La capacidad de transmisión de la conexión en cualquier momento t se modela como una variable aleatoria $\omega(t)$, cuyo valor depende de las condiciones del canal y del mecanismo de control de la congestión. Bajo estas premisas, cada cola se actualiza siguiendo la siguiente expresión:

$$Q_k(t+1) = \max[Q_k(t) - b_k(t), 0] + a_k(t) \quad (1)$$

donde $a_k(t)$ y $b_k(t)$ son las variables de llegada y salida, respectivamente. Cabe señalar que $b_k(t)$ corresponde en realidad a cada variable de decisión $\alpha_k(t)$, mientras que $a_k(t)$ es una variable aleatoria sobre la que no se tiene control alguno. En cada instante de tiempo, se toma una decisión de scheduling a partir de un conjunto \mathcal{A} que establezca las colas de los flujos de aplicación, garantizando que no se supere la capacidad de transmisión, $\sum_k \alpha_k(t) \leq \omega(t) \forall t$. Como se ha expuesto anteriormente, este problema se resuelve mediante el algoritmo BP, basado en la teoría de Lyapunov. Por lo tanto, en cada instante de tiempo se toma la decisión que optimiza el siguiente problema:

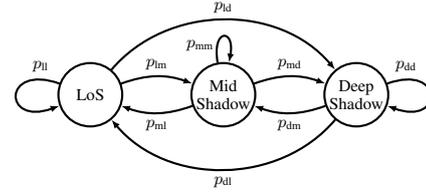
$$\begin{aligned} \max_{\alpha(t)} \quad & \sum_{k=1}^N Q_k(t) \cdot b_k(t) \\ \text{s.t.} \quad & \alpha \in A \end{aligned} \quad (2)$$

Finalmente, su comportamiento se traduce en seleccionar el flujo con mayor ocupación en el *buffer* de aplicación para ser transmitido.

IV. ESCENARIO DE APLICACIÓN

En esta sección se evalúa el rendimiento de los planificadores propuestos sobre comunicaciones NTN, en particular una red de satélites LEO. Se pueden distinguir dos configuraciones: un único enlace Land Mobile-Satellite (LMS), entre una estación terrestre y un satélite; y una comunicación extremo a extremo entre dos estaciones terrestres, incluyendo dos enlaces LMS y varios enlaces Inter-Satellite Link (ISL). Estos últimos podrían sufrir desconexiones temporales, debido al continuo movimiento de los satélites en constelaciones LEO. Para modelar los dos tipos de enlace, se utilizan las cadenas de Markov mostradas en la Fig. 1: para el enlace LMS, se parte del trabajo de Fontán *et al.*, que considera tres situaciones/estados diferentes: (l) Line of Sight (LoS), con condiciones ideales de propagación; (m) mid-shadowing, donde las condiciones se deterioran; y (d) deep-shadowing, en el que la conectividad se ve gravemente perjudicada [24]. Para el ISL, se utiliza una cadena de dos estados, para capturar las desconexiones temporales. Otros trabajos también han utilizado cadenas de Markov para modelar enlaces por satélite [25], [26], [27].

La implementación que se usa de QUIC en este trabajo es `quic-go` (versión 0.15.1), que se modifica para integrar las políticas de scheduling propuestas. La plataforma que se usa para evaluar su rendimiento se representa en la Fig. 2. Combina una implementación real del protocolo QUIC (usando virtualización y contenedores Docker) con la simulación de la conectividad subyacente, explotando el simulador `ns-3`. En ese sentido, se cambia el funcionamiento por defecto del enlace *point-to-point* de `ns-3`, de forma que sus características puedan ser modificadas durante el experimento, de acuerdo con la dinámica establecida por las cadenas de Markov antes mencionadas. De esta forma, se captura el dinamismo de los enlaces LMS y ISL.



(a) Cadena de Markov de tres estados para el canal LMS



(b) Cadena de Markov de dos estados para emular desconexiones temporales en enlaces ISL

Fig. 1: Modelos de cadena de Markov para los enlaces LMS e ISL, utilizados para la evaluación del rendimiento.

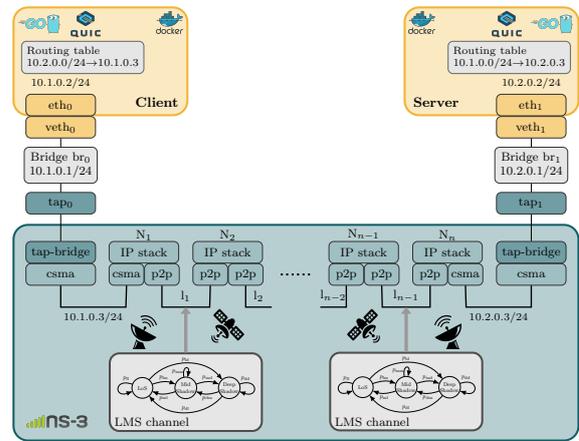


Fig. 2: Esquema de la plataforma utilizado para la evaluación, que integra contenedores docker, ns-3, y los modelos LMS e ISL

V. RESULTADOS

En esta sección se discuten los resultados de la evaluación de TCP y QUIC, incluyendo las diversas estrategias de scheduling, sobre escenarios LEO. Los principales parámetros de la configuración del escenario que se contempla se resumen en la Tabla I. Como puede observarse, se usan dos bandas diferentes, K_a y S , cada una de ellas caracterizada por su matriz de probabilidades de transición, el tiempo medio de permanencia en cada estado, y las tasas de transmisión correspondientes. La velocidad de transmisión máxima, que corresponde a la situación de línea de visión directa, es de 4 y 80 Mbps para las bandas S y K_a , respectivamente. Además, las capacidades del mid- y deep-shadowing se fijan al 50% y 20% de dicha capacidad máxima.

Se compara en primer lugar el rendimiento de QUIC y TCP sobre enlaces LMS, utilizando sus configuraciones por defecto. A continuación, la evaluación se centra en QUIC, analizando el comportamiento de los schedulers descritos en la Sección III sobre enlaces LMS, considerando flujos de tráfico asimétricos. Finalmente, se amplía el escenario, y se analiza el impacto de las desconexiones en enlaces ISL sobre una conectividad

Tabla I: Configuración del escenario

Banda Ka	
Parámetros LMS [24, Table XVII]	
Tasa LMS	[80, 40, 16] Mbps
Tasa del enlace	45.33 Mbps
Matriz de transición LMS	$\mathcal{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0.93156 & 0.068437 \\ 0.34526 & 0 & 0.65474 \\ 0.070012 & 0.92999 & 0 \end{pmatrix}$
Tiempo de estancia de LMS	[0.2530, 0.7299, 0.1666] s
δ	100 ms
Banda S	
Parámetros LMS [24, Table XVII]	
Tasa de LMS	[4, 2, 0.8] Mbps
Tasa del enlace	2.32 Mbps
Matriz de transición LMS	$\mathcal{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0.94076 & 0.059243 \\ 0.77084 & 0 & 0.22916 \\ 0.49418 & 0.50582 & 0 \end{pmatrix}$
Tiempo de estancia LMS	[0.5485, 0.4992, 0.3529] s
δ	100 ms
Aplicación y búfer	
Tamaño del búfer	[7, 15, ∞] Paquetes
Tamaño de paquete	1000 Bytes

extremo a extremo.

A. Rendimiento de TCP y QUIC en un único enlace LMS

Antes de analizar el rendimiento medio de TCP y QUIC en enlaces LMS, la Figura 3 ilustra la variabilidad mostrada por un canal LMS concreto y su impacto en la ocupación del *buffer*, la ventana de congestión (*cwnd*) y el retardo. Aquí, el *buffer* se refiere al del dispositivo punto a punto (Fig. 2), y su ocupación es un indicador de la adaptación del mecanismo de control de congestión a la variabilidad del canal. Los resultados se obtienen a partir de una única transmisión QUIC, con un flujo y tasa de tráfico de aplicación constante, sobre la banda *Ka*, y con capacidad de *buffer* infinita. Los colores de fondo de la Figura 3 representan el estado del canal, y las líneas la evolución instantánea de los diferentes parámetros que se monitorizan.

Como puede observarse en la Figura 3a, el tamaño del *buffer* aumenta durante la conexión, en la que se transmite un fichero de gran tamaño, con variaciones lentas, correladas con la evolución de la ventana de congestión, y variaciones rápidas que dependen del estado concreto del canal. Al mismo tiempo, se observa que el retardo de los paquetes sigue la misma tendencia que la ocupación del *buffer*, mostrando grandes variaciones (lo que daría lugar a un *jitter* elevado) cuando el canal pasa de un estado a otro. Por otro lado, la Figura 3b, muestra la evolución de la ventana de congestión en el mismo experimento. Como puede observarse, este parámetro (*cwnd*) crece mientras el tamaño del *buffer* aumenta, hasta que se produce un evento de tiempo de expiración, en el que la ventana de congestión disminuye su valor, al igual que la ocupación del *buffer*. En definitiva, la Figura 3 muestra que el enlace LMS dificulta la adaptación de los protocolos de transporte a la capacidad de transmisión real, lo que tiene un fuerte impacto en el rendimiento de la aplicación, particularmente en el retardo y el *jitter*.

A continuación, se compara el rendimiento obtenido por

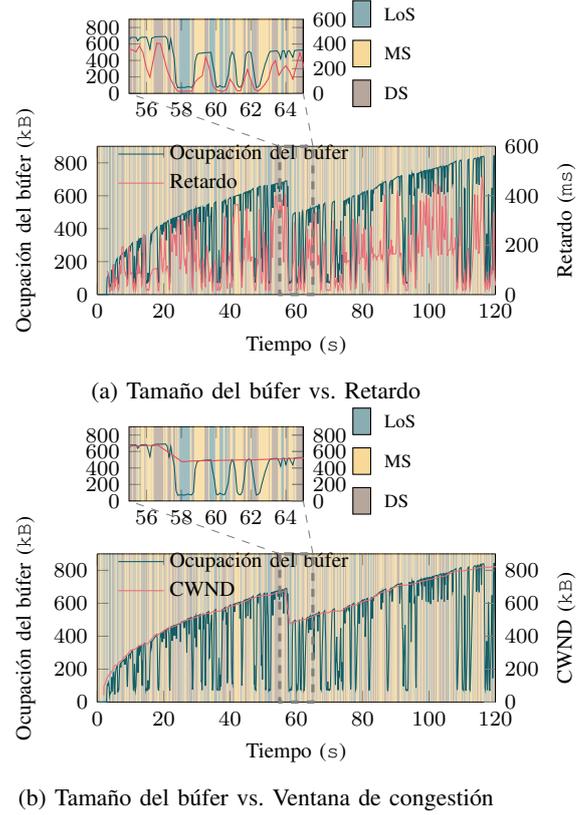


Fig. 3: Ejemplo de evolución del tamaño del *buffer*, ventana de congestión y retardo sobre un canal LMS con *buffer* de capacidad infinita.

QUIC y TCP sobre enlaces *LMS* con diferentes configuraciones. Cabe destacar que ambos protocolos utilizan CUBIC como mecanismo de control de congestión, por lo que es previsible que las variaciones en la conectividad subyacente tenga un impacto similar sobre ambos protocolos [28]. La Figura 4 muestra el retardo por paquetes y el rendimiento de la aplicación obtenidos en ambas bandas, *Ka* y *S*, para diferentes tamaños de *buffer*. Los resultados se promedian sobre 30 ejecuciones independientes, y cada experimento comprende transmisiones activas durante 60 s. En todos los casos, la aplicación genera tráfico a la capacidad media del enlace. Al utilizar QUIC, se representan los resultados obtenidos para distintos números de flujos, utilizando el scheduler por defecto, RR.

Como se podía esperar, se observa que el tamaño del *buffer* tiene un fuerte impacto sobre el retardo. Sin embargo, los resultados muestran que el rendimiento de TCP se ve más perjudicado con valores muy elevados, al utilizar un *buffer* infinito. Dado que ambos protocolos utilizan el mismo control de congestión, esta diferencia se debe a las mejoras en la detección de pérdidas que se implementan en QUIC [29]. Por otro lado, la tasa media es bastante estable, independientemente del protocolo utilizado o del tamaño del *buffer*. En cuanto a la capacidad multi-stream de QUIC, los resultados demuestran que tiene poco impacto en el comportamiento del protocolo. A la vista de los resultados obtenidos se podría concluir que QUIC aporta

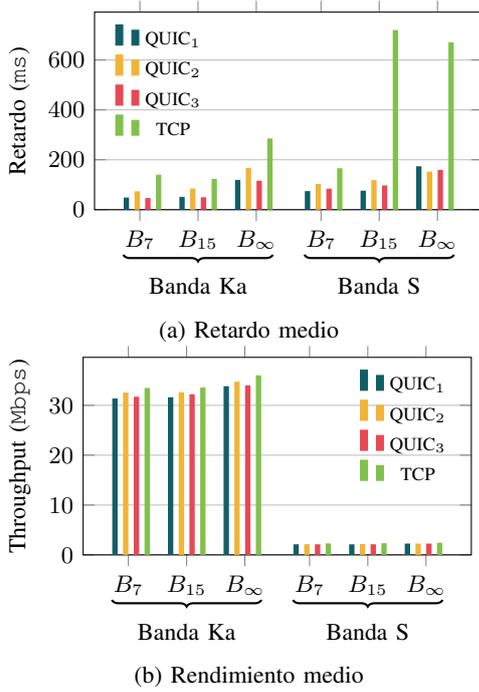


Fig. 4: Comparación de rendimiento entre TCP y QUIC sobre un único enlace LMS. Los resultados medios se obtienen a partir de 30 ejecuciones en las que se genera tráfico durante 1 minuto a una tasa igual a la capacidad media del canal.

Tabla II: Configuración del tráfico de aplicación

Configuración común	
Capacidad media del canal (K_a)	45 Mbps
Tamaño del paquete	1000 Bytes
Distribución	Poisson
Tiempo de generación del tráfico	60 s
Escenario 1 (50%)	
Tasa transmisión de datos	Stream ₁ : 15 Mbps; Stream ₂ : 7.5 Mbps
Escenario 2 (80%)	
Tasa transmisión de datos	Stream ₁ : 27 Mbps; Stream ₂ : 15 Mbps

una solución de transporte más adecuada para canales muy variables, tales como los enlaces LMS.

B. Rendimiento de las estrategias de scheduling sobre un canal LMS

En primer lugar, la Figura 5 muestra la evolución del *buffer* de aplicación utilizando los distintos flujos (filas) y tasas de tráfico (columnas). Se observa que RR y WFQ (primera y segunda filas) no son capaces de adaptarse al desequilibrio de tráfico, dando lugar a ocupaciones del *buffer* de aplicación bastante diferentes. Este comportamiento es más acusado a medida que la tasa de tráfico de aplicación se acerca a la capacidad media del canal. Por otro lado, WFQ proporciona una distribución de recursos (capacidad del canal) más justa entre los dos flujos, dando lugar a una ocupación de *buffer* más equilibrada a medida que se aumenta el tráfico. Sin embargo, no aprovecha de forma óptima a las situaciones en la que las tasas de ambos flujos no se corresponden de manera exacta

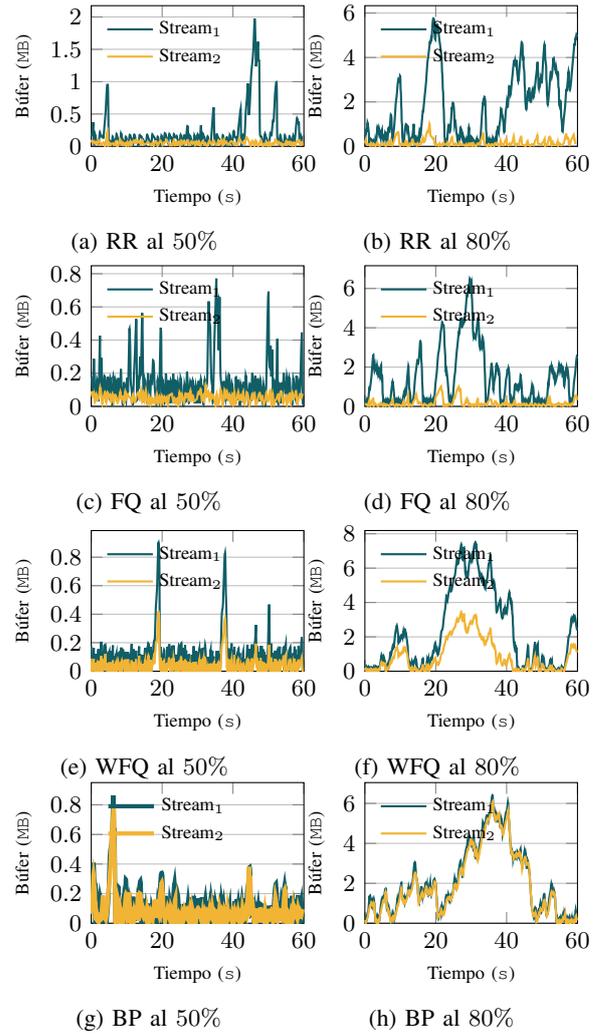


Fig. 5: Evolución del *buffer* de los dos flujos a lo largo del tiempo, utilizando diferentes algoritmos de scheduling y tasas de envío, sobre un enlace LMS.

con su valor medio. Este comportamiento subóptimo se corrige con el tiempo cuando el canal no está saturado, aunque en circunstancias cercanas a la saturación no se observa este efecto, y WFQ es incapaz de proporcionar una distribución justa de los recursos compartidos. Por otro lado, la política propuesta, basada en el algoritmo BP, es capaz de armonizar la ocupación del *buffer* en ambos flujos, independientemente de la variación del canal, incluso cuando el tráfico alcanza la capacidad del mismo, debido a que comprueba la ocupación del *buffer* al construir el paquete QUIC.

A continuación, se analiza el impacto de los schedulers en el comportamiento percibido. Se presta atención al retardo, ya que todos los experimentos anteriores muestran que la diferencia en términos de rendimiento es insignificante. La Figura 6 muestra el retardo medio por paquete (en la aplicación), para cargas de tráfico del 50% y 80% de la capacidad media del canal. Los resultados se obtienen a partir de 30 experimentos independientes, en los que se llevan a cabo conexiones de 60 segundos de duración. Para

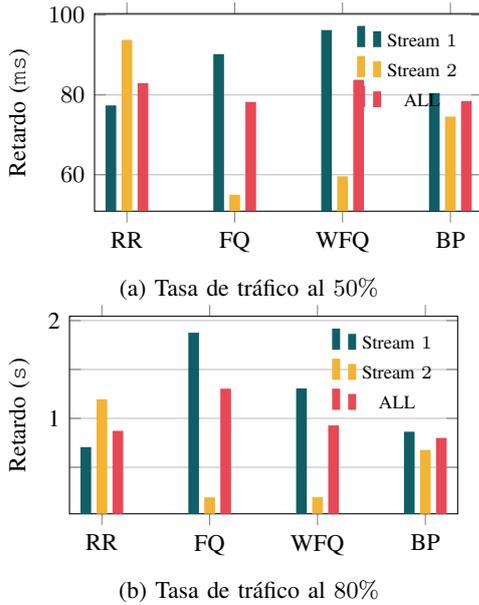


Fig. 6: Retardo medio experimental en un enlace LMS de banda Ka, cuando se utilizan los distintos planificadores

ilustrar mejor el comportamiento se muestran los retardos medios experimentados por cada flujo de forma independiente, así como el promedio de la conexión global. Como puede observarse, los schedulers estáticos (RR, FQ y WFQ) dan lugar a retardos sensiblemente desbalanceados entre ambos flujos, independientemente de la carga de tráfico. Curiosamente, la implementación por defecto RR produce una distribución más justa del retardo, debido al mejor uso de la capacidad total de transmisión. Por otro lado, el algoritmo BP propuesto en este trabajo es capaz de armonizar el retardo de ambos flujos, prácticamente consiguiendo el mismo valor. Además, la solución propuesta produce una ligera reducción global del retardo.

C. Estrategias de planificación sobre escenarios End to End (E2E)

A continuación, se analizan las políticas de programación con una configuración extremo a extremo, abarcando dos enlaces *Ka* que emulan las condiciones de conectividad entre las estaciones terrestres y los satélites, conectados por un único enlace. Como se mencionó en la Sección IV, el ISL se modela con una cadena de Markov de dos estados, lo que permite tener en cuenta situaciones de interrupción en la comunicación, habituales en comunicaciones basadas en redes LEO.

Utilizando la misma configuración que antes, se consideran 2 flujos QUIC desequilibrados, donde la tasa del primero es el doble que la del segundo. Dado que se contemplan situaciones de interrupción con distinta duración, lo que tiene como consecuencia una disminución de la capacidad global de la red, la tasa de tráfico agregada se fija en 50% de la capacidad media LMS. El enlace ISL se modela con tiempos de permanencia distribuidos exponencialmente: (1) periodo activo con una tasa de transmisión de 80 Mbps y un tiempo medio de

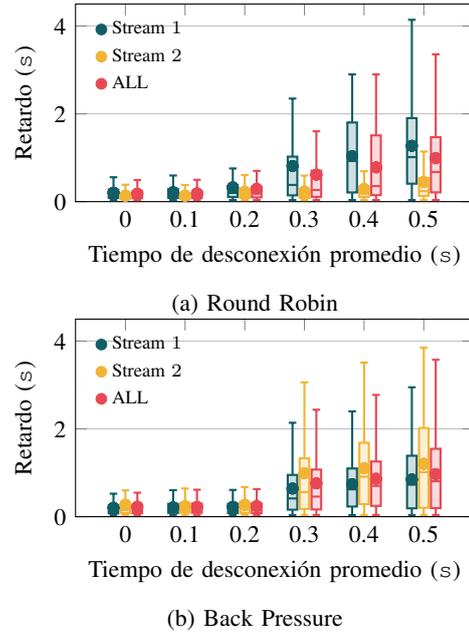


Fig. 7: Distribución de retardos con RR y BP sobre una red E2E con interrupciones e en el canal ISL.

permanencia de 5s; y (2) estado inactivo que emula las eventuales desconexiones del enlace y cuyo tiempo medio de permanencia se incrementa de 0 a 0.5 segundos. Para cada valor del tiempo medio de interrupción, se ejecuta una simulación independiente, con una duración de 120 s, lo que garantiza un número suficiente de transiciones de los estados en los diferentes canales, obteniendo resultados estadísticamente significativos. La ejecución sólo se detiene cuando se reciben todos los bytes en la aplicación receptora.

La Figura 7 muestra la distribución del retardo medio extremo a extremo de ambos flujos para las cuatro estrategias de scheduling estudiadas, a medida que se aumenta el tiempo medio de interrupción en el enlace ISL. Se puede observar que el retardo medio de extremo a extremo aumenta de forma constante, así como su dispersión. Esta variabilidad es ligeramente mayor cuando se utiliza el algoritmo propuesto en este trabajo, BP, que, por otro lado, consigue garantizar un comportamiento más equilibrado para los dos *streams*, ya que consigue armonizar los *buffer* para todas las configuraciones.

VI. CONCLUSIÓN

Este trabajo evalúa el rendimiento de los protocolos de transporte (TCP y QUIC) sobre redes LEO. Como se ha podido ver, se trata de uno de los primeros trabajos en afrontar un análisis con este objetivo. Para ello se ha propuesto una metodología novedosa que combina técnicas de virtualización, implementaciones reales de protocolos, y entornos de simulación de red, para realizar experimentos sistemáticos con un modelado realista de la conectividad subyacente. Los resultados demuestran que QUIC mejora el comportamiento de TCP sobre canales con alta variabilidad.

Además, se han caracterizado minuciosamente distintas estrategias de scheduling que explotan la capacidad multi-streaming de QUIC. Se ha visto que el algoritmo utilizado por defecto en la implementación `quic-go` es subóptimo con flujos con tráfico desequilibrado. La estrategia WFQ puede mantener la velocidad de transmisión sin afectar significativamente al retardo medio, pero no es capaz de adaptarse a situaciones de tráfico desequilibrado. Por otro lado, el esquema propuesto, basado en el algoritmo *Back-pressure*, estabiliza dinámicamente las longitudes de cola de los flujos activos, utilizando únicamente el estado del buffer.

La metodología propuesta permite aumentar la complejidad de la conectividad subyacente introduciendo tiempos de desconexión en enlaces ISL (como se ha descrito en los últimos experimentos comentados en el artículo) o tráfico de fondo. Como trabajo futuro, se explotará esta funcionalidad para ampliar el análisis e incluir otras características, como los mecanismos de control de la congestión. Además, se estudiará la utilización de nuevos algoritmos de scheduling que tengan en cuenta explícitamente el retardo del tráfico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Fondo Europeo de Desarrollo Regional, MINECO-FEDER, a través del proyecto SITED: *Semantically-enabled Interoperable Trustworthy Enriched Data-spaces (PID2021-125725OB-I00)*. El trabajo de Fátima Fernández ha contado con la financiación del Gobierno Vasco a través del programa Elkartek en el marco del proyecto EGIA (KK-2022/00119) y del Programa de Doctorado Industrial de la Universidad de Cantabria (Convocatoria 2020).

REFERENCIAS

- [1] Poorzare, Reza and Calveras, Anna, "Open Trends On TCP Performance Over Urban 5G MmWave Networks," in *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, ser. PE-WASUN '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, p. 85–92. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3416011.3424749>
- [2] J. Iyengar and M. Thomson, "QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport," RFC 9000, may 2021. [Online]. Available: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc9000.txt>
- [3] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, "6g and beyond: The future of wireless communications systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133 995–134 030, 2020.
- [4] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "The road towards 6g: A comprehensive survey," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334–366, 2021.
- [5] S. Liu, Z. Gao, Y. Wu, D. W. Kwan Ng, X. Gao, K.-K. Wong, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "Leo satellite constellations for 5g and beyond: How will they reshape vertical domains?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 7, pp. 30–36, 2021.
- [6] I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Röper, D. Wübben, B. Matthiesen, A. Dekorsy, and P. Popovski, "Leo small-satellite constellations for 5g and beyond-5g communications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184 955–184 964, 2020.
- [7] M. Hosseinian, J. P. Choi, S.-H. Chang, and J. Lee, "Review of 5g ntn standards development and technical challenges for satellite integration with the 5g network," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 8, pp. 22–31, 2021.
- [8] T. Darwish, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, M. Bellemare, and G. Lamontagne, "Leo satellites in 5g and beyond networks: A review from a standardization perspective," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35 040–35 060, 2022.
- [9] O. Kodheli, S. Andrenacci, N. Maturo, S. Chatzinotas, and F. Zimmer, "An uplink ue group-based scheduling technique for 5g mmcs systems over leo satellite," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 67 413–67 427, 2019.
- [10] R. Xie, Q. Tang, Q. Wang, X. Liu, F. R. Yu, and T. Huang, "Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: Architecture, challenges, and open issues," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 224–231, 2020.
- [11] K. Wei, Q. Tang, J. Guo, M. Zeng, Z. Fei, and Q. Cui, "Resource scheduling and offloading strategy based on leo satellite edge computing," in *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, 2021, pp. 1–6.
- [12] Z. Tang, H. Zhou, T. Ma, K. Yu, and X. S. Shen, "Leveraging leo assisted cloud-edge collaboration for energy efficient computation offloading," in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2021, pp. 1–6.
- [13] T. Shreedhar, R. Panda, S. Podanev, and V. Bajpai, "Evaluating quic performance over web, cloud storage, and video workloads," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 19, no. 2, pp. 1366–1381, 2022.
- [14] P. Qian, N. Wang, and R. Tafazolli, "Achieving robust mobile web content delivery performance based on multiple coordinated quic connections," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 11 313–11 328, 2018.
- [15] J. Dizdarević and A. Jukan, "Experimental benchmarking of http/quic protocol in iot cloud/edge continuum," in *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, 2021, pp. 1–6.
- [16] H. Tsunoda, N. Kato, A. Jamalipour, and Y. Nemoto, "Performance evaluation of sctp wth adaptive multistreaming over leo satellite networks," in *2007 International Workshop on Satellite and Space Communications*, 2007, pp. 150–154.
- [17] Z. Zhang, Q. Guo, and Z. Gao, "A prediction based sctp handover scheme for ip/leo satellite network," in *2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2010, pp. 1–4.
- [18] W. Yang, S. Shu, L. Cai, and J. Pan, "Mm-quic: Mobility-aware multipath quic for satellite networks," in *2021 17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*, 2021, pp. 608–615.
- [19] A. Martin and N. Khademi, "On the suitability of bbr congestion control for quic over geo satcom networks," in *Proceedings of the Workshop on Applied Networking Research*, ser. ANRW '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3547115.3547194>
- [20] S. Yang, H. Li, and Q. Wu, "Performance analysis of quic protocol in integrated satellites and terrestrial networks," in *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2018, pp. 1425–1430.
- [21] X. Shi, L. Wang, F. Zhang, B. Zhou, and Z. Liu, "Pstream: Priority-based stream scheduling for heterogeneous paths in multipath-quic," in *2020 29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2020, pp. 1–8.
- [22] T. Viernickel, A. Froemmgen, A. Rizk, B. Koldehofe, and R. Steinmetz, "Multipath quic: A deployable multipath transport protocol," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, pp. 1–7.
- [23] M. J. Neely, *Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems*. Morgan and Claypool Publishers, 2010.
- [24] F. P. Fontan, M. Vazquez-Castro, C. E. Cabado, J. P. Garcia, and E. Kubista, "Statistical modeling of the lms channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 6, pp. 1549–1567, 2001.
- [25] A. Chen, C. Chang, and Y. Yao, "Performance evaluation of arq operations with obp and inter-satellite links: delay performance," in *IEEE 54th Vehicular Technology Conference Proceedings (VTC Fall 2001)*, vol. 4, 2001, pp. 2346–2350 vol.4.
- [26] R. Hermenier, C. Kissling, and A. Donner, "A delay model for satellite constellation networks with inter-satellite links," in *2009 International Workshop on Satellite and Space Communications*, 2009, pp. 3–7.
- [27] Y. Zhu, M. Sheng, J. Li, and R. Liu, "Performance analysis of

- intermittent satellite links with time-limited queuing model,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 2282–2285, 2018.
- [28] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, “Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant,” *ACM SIGOPS operating systems review*, vol. 42, no. 5, pp. 64–74, 2008.
- [29] J. Iyengar and I. Swett, “QUIC Loss Detection and Congestion Control,” RFC 9002, May 2021. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9002>