



Metodología para el análisis del comportamiento de protocolos de transporte sobre canales variantes: Aplicación en escenarios NTN

Fátima Khan*, Fátima Fernández[†], Luis Díez*, 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

La proliferación de nuevas tecnologías inalámbricas, así como de las correspondientes topologías de acceso, hace necesaria la evaluación del rendimiento de protocolos, tanto tradicionales como los que están apareciendo de manera más reciente, sobre dichos escenarios. Aunque la comunidad científica suele utilizar emuladores de enlaces con este fin, estos no están concebidos para reflejar, de manera precisa, la gran variabilidad temporal de algunos canales inalámbricos. Por otro lado, los simuladores de red proporcionan una implementación detallada de las capas inferiores, que puede abstraerse para analizar el rendimiento de los protocolos superiores. Como solución de compromiso, en este artículo se propone un enfoque de simulación ligero, utilizando el simulador ns-3, que utiliza modelos dinámicos de capacidad de canal procedentes de la literatura. El enfoque propuesto se ha utilizado para modelar topologías de acceso basadas en LEO, sobre los que se evalúa el comportamiento del protocolo TCP bajo diferentes configuraciones.

Palabras Clave—ns-3, Markov Chain, modeling, RAN, LEO

I. INTRODUCCIÓN

El continuo desarrollo y transformación de las tecnologías inalámbricas y, en particular, de las redes de acceso radio (RAN), hace necesario reexaminar el rendimiento de los protocolos que operan sobre ellas. Así, en los últimos años muchos trabajos han analizado el rendimiento de TCP sobre canales mmWave [1], y se han desarrollado además herramientas para este propósito [2]. Por otro lado, las nuevas generaciones de comunicaciones móviles promueven, como ya se ha adelantado, innovadoras arquitecturas de redes de acceso que se integran con las redes no terrestres (NTN), incluyendo aquellas basadas en drones y satélites de baja órbita, Low Earth Orbit (LEO).

En estas circunstancias, cuando los despliegues reales no son una alternativa viable, la evaluación de las nuevas

tecnologías de acceso suele realizarse mediante simulación. Los modelos empleados suelen centrarse en las capas inferiores (MAC y PHY), que pueden llegar a tener una granularidad temporal de milisegundos o microsegundos. En cambio, los protocolos de capas superiores operan en una escala temporal sensiblemente mayor. En este sentido, estos protocolos de transporte suelen analizarse utilizando herramientas que normalmente no incluyen mucho detalle de capas inferiores, como los emuladores de enlace. Por ejemplo, Pantheon, un marco para el análisis de mecanismos y algoritmos de control de congestión [2], incorpora el emulador de enlace MahiMahi [3]. Por otro lado, se ha demostrado que el comportamiento de los enlaces inalámbricos puede modelarse de manera suficientemente precisa a través de cadenas de Markov, asumiendo diferentes estados de transmisión [4], [5], [6].

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en este trabajo describimos una metodología de análisis, que aprovecha el simulador ns-3 para analizar el rendimiento de protocolos de capas altas sobre enlaces inalámbricos altamente dinámicos. La solución propuesta permite evaluar tanto enlaces simples como topologías más complejas, abarcando múltiples enlaces con diferentes características. El objetivo de este trabajo es por tanto diseñar y desarrollar una metodología de simulación eficiente y flexible, para evaluar el rendimiento de protocolos de capas superiores sobre entornos inalámbricos. Para lograr esto, se hace uso de ns-3, un popular simulador de red de código abierto, como base para la herramienta propuesta. El enfoque que se presenta en el trabajo se basa en la creación de escenarios de simulación que representan diferentes configuraciones de conectividad inalámbrica. Éstas pueden ser sencillas, como una conexión punto a punto, o más complejas, involucrando múltiples nodos y enlaces interconectados. La versión modificada de ns-3 con los modelos propuestos, así como las utilidades de automatización que se han

desarrollado se encuentran disponibles públicamente en el repositorio Github ¹.

La herramienta que se ha desarrollado permite ajustar diferentes características de los enlaces, como la tasa de transmisión, el retardo y el modelo de pérdida de paquetes, para emular diferentes condiciones de red realistas. Aunque la metodología sugerida no está vinculada a una tecnología inalámbrica específica, se utilizará una red de acceso basada en satélites LEO como ejemplo ilustrativo para validar la propuesta, ya que requiere modelar tanto los propios enlaces inalámbricos como la topología RAN global. Esta metodología de análisis ha sido adoptada por Hervella *et al.* para comparar el rendimiento de TCP y QUIC [7]. Sin embargo, este trabajo se centra en describir la metodología de simulación sobre ns-3, más que en una evaluación concreta, al tiempo que se amplían las posibilidades que se incluyen.

En conjunto, el enfoque propuesto permite una simulación simplificada (de manera que se pueda adaptar a la dinámica temporal de las capas superiores), pero a la vez precisa, de las tecnologías inalámbricas, manteniendo una implementación detallada para las capas superiores. Una de las ventajas de este enfoque es que aprovecha la limitada complejidad de la simulación, lo que permite una interacción con aplicaciones en tiempo real utilizando la herramienta ns-3 TAP. Esto es especialmente útil cuando se desea evaluar cómo las aplicaciones interactúan con los protocolos de capa de transporte en entornos inalámbricos, lo que puede proporcionar información valiosa sobre el desempeño y la eficiencia de estas aplicaciones en escenarios reales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a pesar de que la metodología de simulación propuesta logra reflejar apropiadamente el comportamiento de las tecnologías inalámbricas subyacentes, los modelos teóricos utilizados pueden ser menos precisos en comparación con una simulación de mayor detalle. La simulación con gran nivel de precisión implicaría por su parte tener en cuenta cada detalle y cada evento en el sistema, logrando reflejar de manera más exacta el comportamiento de los protocolos en situaciones específicas. Sin embargo, para diferentes aplicaciones y servicios, el modelado detallado que habilita una simulación *de grano fino* pueden no tener un impacto relevante.

Las contribuciones de este trabajo pueden resumirse como sigue:

- 1) Descripción de un enfoque de simulación ligero, que permite analizar el comportamiento de protocolos de capas altas (transporte/aplicación) sobre redes con conectividad inalámbrica. Se detalla la construcción de los escenarios de simulación, indicando qué características se pueden ajustar y qué protocolos de capa alta se utilizan para generar tráfico. Esta descripción proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollo de soluciones en el ámbito de las redes inalámbricas.
- 2) Evaluación de la viabilidad de la metodología propuesta, a partir de un escenario relevante que repre-

senta condiciones de red realistas, se han realizado una exhaustiva campaña de experimentos para evaluar el rendimiento de protocolos de capas alta sobre diferentes configuraciones de enlaces inalámbricos. Los resultados que se presentan demuestran la utilidad y aplicabilidad de la metodología propuesta para comprender y mejorar el rendimiento de los protocolos sobre entornos inalámbricos, incluso altamente dinámicos.

- 3) Disponibilidad del código en un repositorio abierto, para fomentar la colaboración y permitir que otros investigadores puedan utilizar la metodología propuesta. Esto permite a la comunidad científica acceder, revisar, utilizar, y contribuir al desarrollo de la solución de simulación ligera en ns-3 descrita en el artículo. Al hacerlo, se promueve asimismo la reproducibilidad de los resultados mostrados, así como el avance en el campo de las redes inalámbricas.

El resto del documento se estructura como sigue. En la Sección II se revisan las alternativas para evaluar protocolos de capas altas sobre diferentes redes con conectividad inalámbrica. A continuación, en la Sección III se describe la implementación de la metodología propuesta, que posteriormente se evalúa en la Sección IV, analizando el comportamiento del protocolo TCP sobre una red de acceso basada en LEO. Finalmente, en la Sección V se resumen las principales contribuciones del artículo, identificando algunos aspectos que serán abordados en el futuro.

II. ESTADO DEL ARTE

Existe una gran variedad de herramientas y entornos de simulación y emulación, con diferentes funcionalidades y características. Por un lado, los emuladores en tiempo real como DummyNet [8] o NetEm [9] permiten limitar la capacidad de transmisión, y añadir colas con diferentes políticas de gestión. Además, permiten emular diferentes retardos y eventos de pérdidas de tramas/paquetes.

Del mismo modo, las herramientas de emulación de redes como Mininet utilizan configuraciones similares para los enlaces que conectan los nodos de la red [10]. Aunque estas herramientas son capaces de proporcionar un gran grado de realismo, no están pensadas para reflejar las características de canales dinámicos, por ejemplo con capacidad variable, como es el caso de los enlaces inalámbricos.

También merece la pena mencionar el emulador de enlaces MahiMahi [3]. Además de las funcionalidades de emulación proporcionadas por las herramientas anteriores (capacidad de transmisión, retardo del enlace, colas), MahiMahi puede configurarse con trazas de capacidad registradas en configuraciones reales. Aunque esta característica se puede utilizar para emular canales dinámicos, no permite utilizar modelos teóricos, con lo que los resultados están limitados a las condiciones particulares de los escenarios en los que se obtuvieron las trazas.

En cuanto a los simuladores de red, como Omnet++ [11] o ns-3 [12], proporcionan mucha más flexibilidad en el

¹<https://github.com/tlmat-unican/Lightweight-ns-3-link-simulation>

modelado de los mecanismos de comunicación subyacentes, por lo que se podrían incluir modelos teóricos. Sin embargo, se centran en replicar con precisión el comportamiento de entornos reales, lo que conduce a implementaciones con un elevado grado de complejidad en las capas inferiores necesarias, lo que dificulta la posibilidad de realizar evaluaciones sobre escenarios complicados, que contemplen un número de dispositivos elevado.

El enfoque propuesto busca mantener la complejidad de ns-3 en las capas superiores, al mismo tiempo que simplifica el modelado de las capas inferiores mediante la utilización de enlaces dinámicos, que logran un grado de realismo apropiado, aun manteniendo una complejidad limitada.

III. SIMULACIÓN A NIVEL DE ENLACE

En esta sección se detallan las modificaciones realizadas en ns-3 y el desarrollo adicional necesario para implementar la metodología propuesta, y el marco de simulación ligero en la que se basa. En resumen, se utiliza el objeto enlace punto a punto para emular canales individuales con modelos teóricos/empíricos, y se crean además utilidades para desplegar escenarios más complejos, a partir de archivos de configuración, con el objetivo de facilitar la realización sistemática y repetitiva de experimentos.

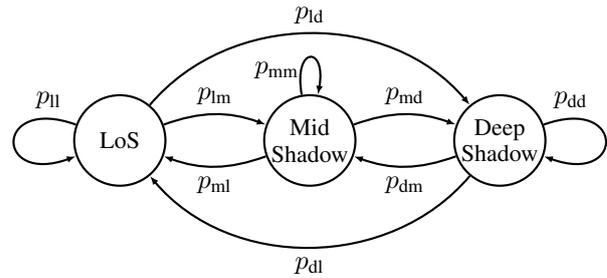
A. Adaptación enlace punto a punto

La implementación llevada a cabo se aprovecha principalmente en la funcionalidad proporcionada por el dispositivo punto a punto, implementado por la clase `PointToPointNetDevice` de ns-3. Está compuesto por un `buffer` que recibe tráfico y, a su vez, una interfaz caracterizada por una determinada velocidad de transmisión y probabilidad de error.

Con esas características de base, el simulador utiliza la capacidad, y la longitud de los paquetes, para programar los eventos correspondientes a la transmisión de paquetes a través de la interfaz. Además, la velocidad de transmisión se fija habitualmente al principio de la simulación, permaneciendo inalterada durante todo el experimento.

Por otro lado, la clase `PointToPointNetDevice` tiene un método público (`SetDataRate`) que permite cambiar la tasa durante la simulación. Al hacer uso del mismo se observaron algunos problemas, principalmente en casos extremos. En concreto, cuando la capacidad se establece en 0 (por ejemplo, si se pretende emular una desconexión temporal), el dispositivo no era capaz de reiniciar la transmisión de los paquetes en cola, una vez se volviera a incrementar la velocidad. Para superar esta limitación, cada vez que se produce un cambio de velocidad, y el valor anterior era 0, se comprueba la ocupación del `buffer`. Si hubiera algún paquete en espera, se iniciaría su transmisión (se llama a la función `TransmitStart`), de forma que el dispositivo recupera su funcionamiento normal.

En cualquier caso, cabe destacar que el cambio de velocidad de transmisión no modifica las transmisiones activas, por lo que los eventos de transmisión de paquetes



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



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

Fig. 1: Cadenas de Markov integradas

no se reprograman ante una modificación de la capacidad de la interfaz.

B. Integración de los modelos de conectividad

Para reflejar el comportamiento del canal subyacente se plantea la integración de modelos basados en Cadenas de Markov, habituales para emular el comportamiento de enlaces inalámbricos. Como se ha dicho anteriormente, se utilizará un escenario basado en comunicaciones LEO para validar la metodología propuesta. Se utilizarán redes que incorporan dos tipos de enlaces: (1) entre la estación terrena y el primer satélite (o entre el último satélite y la estación terrena en recepción); y (2) enlaces entre satélites. Para el primer tipo de enlace (canal LMS), se plantea utilizar la un modelo (ver Figura 1a) basado en una cadena de Markov con 3 estados [4]. Así, se considera que los enlaces pueden pasar por diferentes condiciones, debidas a posibles desvanecimientos y obstáculos, que a su vez repercutirían en la velocidad de transmisión. Por lo tanto, teniendo en cuenta estas características ambientales, el canal transita entre los siguientes estados: line of sight (LoS) con condiciones ideales; mid-shadowing (MS), en el que las condiciones de conectividad empeoran; y deep-shadowing (DS), en el que la capacidad de transmisión se ve gravemente afectada. En cada estado, la capacidad de transmisión se considera constante.

Por su parte, para los enlaces entre satélites, se plantea la utilización de cadenas de Markov con 2 estados que modelan dos posibles situaciones: capacidad constante e interrupciones [13], como puede verse en la Fig. 1b. En este caso, la capacidad en un estado de interrupción (*off*) es cero.

Para cada enlace del escenario, se implementa una cadena de Markov independiente, que gobierna los cambios de la tasa de transmisión en una conexión punto a punto, reflejando las situaciones descritas anteriormente. De esta forma, cuando un enlace cambia a un nuevo estado, el

simulador llama a la función `SetDataRate` del dispositivo punto a punto correspondiente, y programa un evento para cambiar nuevamente de estado según la distribución de tiempos de permanencia. Este proceso se repite hasta el final de la simulación, de manera independiente para todos los enlaces, y sin tener en cuenta si están en uso actualmente, a diferencia de los emuladores de canal basados en trazas.

C. Definición del escenario

En esta sección se muestran el conjunto de utilidades que se han desarrollado para crear una topología personalizada basada en un escenario ns-3 genérico. El escenario se alimenta con un archivo de configuración JSON que describe completamente la topología de la red. En concreto, define el número de enlaces del escenario, así como su tipo y características. Hasta ahora, se han implementado enlaces que adoptan los modelos de las cadenas de Markov de 3 y 2 estados antes mencionados, así como enlaces ideales con configuraciones estáticas. En el caso de aquellos basados en cadenas de Markov, se definen a su vez varios subtipos, que representan configuraciones para diferentes bandas de frecuencia, utilizando datos de la bibliografía [4].

Por simplicidad, las configuraciones detalladas de los modelos (matrices de transición, tiempos medios de permanencia en los estados, entre otros) se implementan en código C++, y el fichero de configuración sólo indica el modelo que hay que cargar para cada enlace. En el futuro, se pretende generalizar la implementación, de modo que las propias cadenas de estados puedan definirse también mediante ficheros de configuración.

En todos los casos, el JSON también establece el valor de los parámetros heredados del enlace punto a punto, y de los dispositivos que no dependen del modelo adoptado: tasa de error, retardo, MTU y tamaño del *buffer*. Además, la implementación permite inyectar tráfico de fondo TCP en cada enlace de forma independiente. Este flujo de tráfico se genera mediante una aplicación ON-OFF, y el fichero de configuración define sus principales atributos: tasa de tráfico, tamaño del paquete, número de bytes, y tiempos en los estados ON y OFF.

Por último, esta configuración proporciona la versatilidad necesaria para instanciar tanto un cliente como un servidor con el propósito de generar el tráfico que será objeto de análisis. Este enfoque es aplicable tanto en el entorno nativo de ns-3 como mediante la aplicación de técnicas de virtualización. La virtualización implica la creación de un enlace transparente de tipo `csma` caracterizado por una capacidad infinita y la ausencia de retardo. Este flujo atraviesa la topología definida y se generan registros que permiten monitorizar la transmisión y recepción de paquetes, la ventana de congestión, la ocupación de los *buffer* de todos los enlaces, así como la variación de la capacidad del canal.

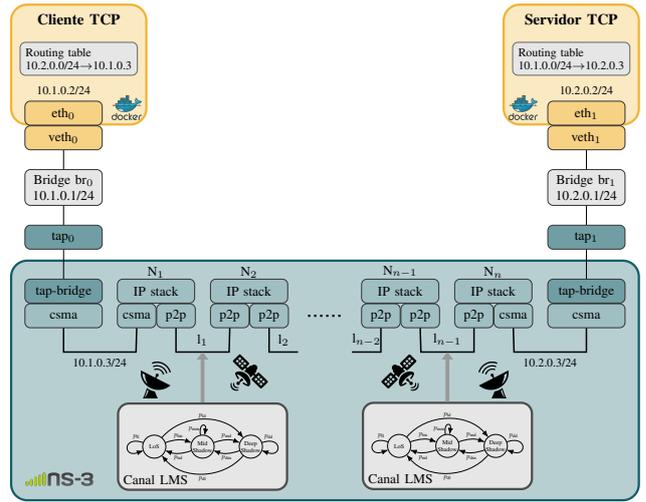


Fig. 2: Diagrama del banco de pruebas para llevar a cabo la evaluación que integra NS-3, contenedores Docker y el modelo LMS.

IV. VALIDACIÓN Y CASO DE USO DE LA APLICACIÓN

En esta sección, se valida la metodología propuesta, así como el correcto funcionamiento de las utilidades implementadas sobre un escenario de comunicaciones LEO, y que se muestra en la Figura 2. Como puede observarse, el escenario emula dos enlaces de satélite móvil terrestre (LMS), que conectan estaciones terrestres y satélites. Además, se pueden añadir varios enlaces inter-satélite (ISL), con diferentes características. En los nodos que emulan las estaciones terrenas, se envía tráfico TCP, utilizando CUBIC como algoritmo de control de congestión [14], con una tasa constante que iguala la tasa media de los enlaces de acceso.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos sobre un único enlace sencillo, controlado para validar el correcto comportamiento de la metodología propuesta. Posteriormente, se amplía la evaluación con una configuración más realista, abarcando tanto canales LMS como enlaces ISL, con tráfico de fondo y desconexiones. La Tabla I resume los parámetros de configuración utilizados en los experimentos llevados a cabo. Como se puede apreciar la velocidad de transmisión máxima, corresponde a la situación de línea de visión directa, cuyo valor es de 80 Mbps [4]. Además, las capacidades en situaciones de mid-shadowing y deep-shadowing se ajustan al 50% y al 20%, respectivamente, de esa capacidad máxima.

A. Modelo sintético

Este escenario contempla un único enlace modelado como una cadena de Markov de 3 estados y una capacidad de transmisión en cada estado definida en la Tabla I. La configuración imita el canal LMS definido en [7], pero con tiempos de permanencia constantes de 5 segundos, para hacerlo más predecible y poder analizar mejor el comportamiento de TCP y su mecanismo de control de congestión. Los valores de capacidad de transmisión se

Tabla I: Configuración de los escenarios

Enlace LMS	
Modelo	Cadena de 3 estados Sintético y Realista [7]
Capacidad media del enlace	≈ 45 Mbps
Capacidad de los estados	[80, 40, 16] Mbps
Capacidad de la cola	0.5 · BDP
Retardo base	10 ms
Enlace ISL	
Modelo	Cadena de 2 estados Tasa constante
Capacidad de los estados	2 estados: [0, 80] Mbps Tasa constante: 50 Mbps
Tasa del tráfico de fondo	[5, 20] Mbps
Tiempo medio de interrupción	[0, 3] s
Capacidad de la cola	Sin límite (∞)
Retardo base	10 ms
Aplicación	
Tasa de los datos de aplicación	40 Mbps
Tamaño del fichero	300 MB

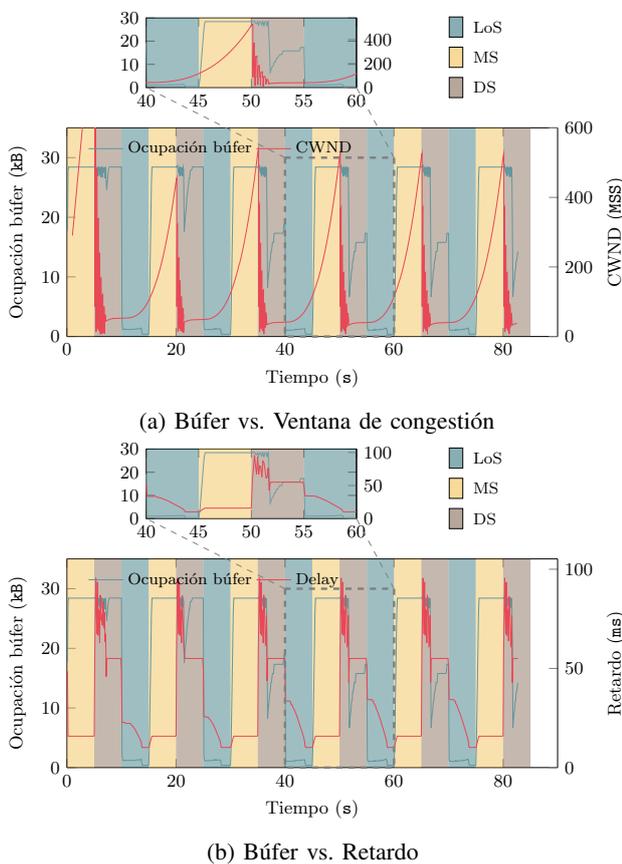


Fig. 3: Creación de un único canal de 3 estados con un tiempo constante de permanencia de 5 segundos.

definen para emular las condiciones de los canales LoS, MS y DS, tal y como se menciona en la Sección A.

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la conexión, utilizando diferentes colores de fondo para cada estado. Primero, la Figura 3a muestra la evolución de la ocupación del *buffer* (eje izquierdo) y de la ventana de congestión (*cwnd*, eje derecho). Como puede observarse,

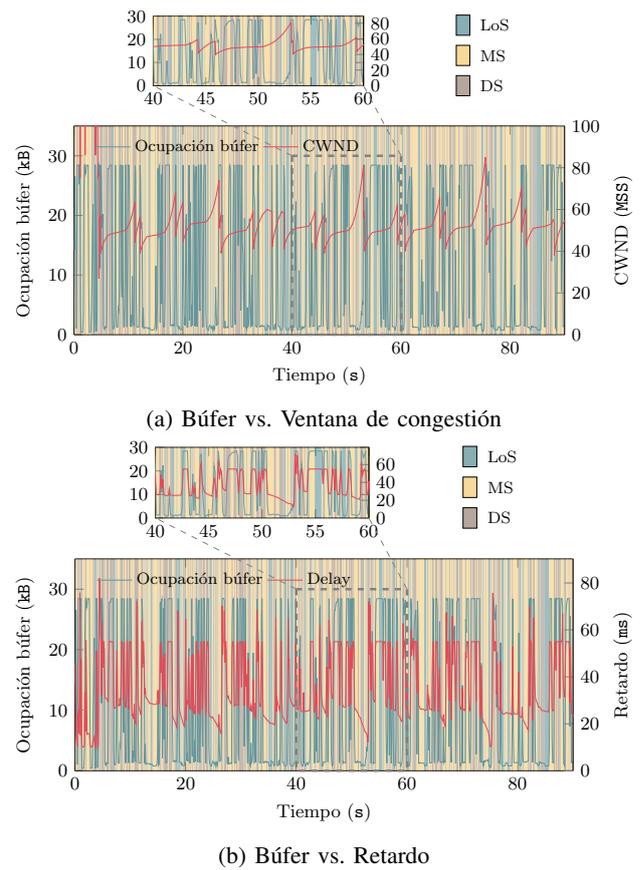


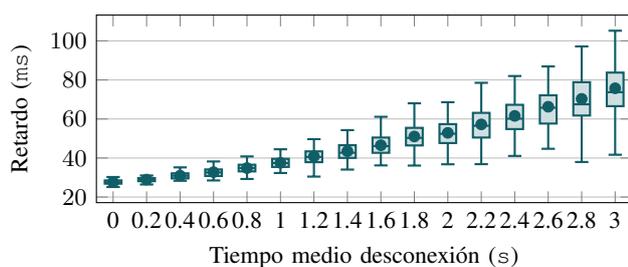
Fig. 4: Realización de un único canal LMS como se define en [7]

el *buffer* se satura durante los periodos MS y DS, y se vacía durante las condiciones LoS. En cuanto a la ventana de congestión, crece de forma constante durante los estados MS y LoS, y se reduce de manera brusca al principio de las fases DS, cuando se producen pérdidas por saturación del *buffer*, el cual se ajustó previamente al 50% del producto entre el ancho de banda y el retardo medio de propagación (BDP). Este ajuste se realiza con el propósito de estudiar de manera detallada este fenómeno.

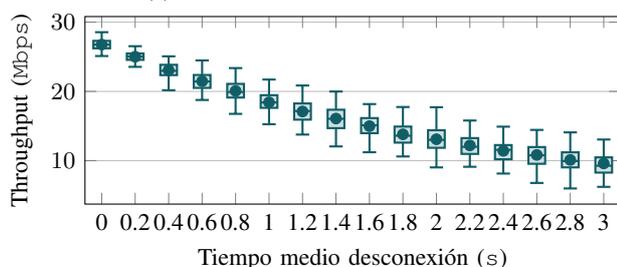
La Figura 3b ilustra, para la misma simulación, la evolución del *buffer* y del retardo, definido como la diferencia entre la transmisión de un paquete y su correcta recepción en el destino. En este caso, se puede observar que el retardo aumenta notablemente en la transición de los estados MS a DS. Además, se ve que, cuando el canal está en la situación de DS, se reduce bruscamente, como consecuencia del agotamiento de la ventana de congestión. Finalmente, alcanza su valor mínimo durante las condiciones LoS. Este comportamiento es coherente con el funcionamiento de TCP Cubic, aunque se obtendrían patrones diferentes para distintos tamaños de *buffer*.

B. Análisis basado en comunicaciones LEO

Se amplían ahora los resultados, utilizando un modelo de canal realista para el enlace LMS. El modelo es de nuevo una cadena de Markov de 3 estados, con tiempos de permanencia distribuidos exponencialmente, y transiciones



(a) Distribución del retardo medio.



(b) Distribución del rendimiento medio.

Fig. 5: Impacto de las desconexiones en el enlace ISL para las comunicaciones extremo a extremo. Los resultados se obtienen a partir de 100 simulaciones para cada valor de tiempo medio de desconexión.

con probabilidades definidas en [7]. En primer lugar, se analiza el comportamiento de un único enlace LMS, para abordar posteriormente las comunicaciones extremo a extremo, abarcando dos enlaces LMS, ascendente y descendente, y enlaces entre satélites con tráfico de fondo e interrupciones.

La Figura 4 muestra los resultados que presentaron para el canal LMS ‘sintético’, en este caso para una configuración realista. De nuevo, los colores de fondo indican el estado del canal. Como puede observarse, existe una variación muy rápida de las condiciones del canal entre cualquier par de estados, lo que lo vuelve muy impredecible.

En la Figura 4a se muestra la evolución del *buffer* y la ventana de congestión a lo largo del tiempo. En este caso, la ventana de congestión apenas aumenta, debido a las continuas variaciones de capacidad, que dificultan la adaptación de la tasa de transmisión. Esto se evidencia en el detalle que se hace de un intervalo de la conexión, donde se observa que el *buffer* está vacío incluso en situación DS, debido al pequeño tamaño de la ventana de congestión. En este sentido, la Figura 4 muestra que el retardo del tráfico sigue la tendencia de ocupación del *buffer*. Dado que el control de congestión no es capaz de aprovechar toda la capacidad del canal, se envía menos tráfico, y el retardo es relativamente inferior al observado en la Figura 3b para el canal LMS sintético. De nuevo, los resultados son coherentes con el funcionamiento del mecanismo de control de congestión empleado por TCP, Cubic.

A continuación, se analiza el comportamiento extremo a extremo en un escenario con dos enlaces LMS (ascendente

y descendente) y un ISL que los conecta. El enlace ISL se modela como una cadena de Markov de 2 estados con tiempos de permanencia distribuidos exponencialmente y definidos como sigue (ver Tabla I): periodo activo con una tasa de transmisión de 80 Mbps (mayor que la capacidad media de los enlaces LMS realistas) y un tiempo de permanencia medio de 5 s; y estado inactivo, que refleja las situaciones de interrupción del enlace, y cuyo tiempo de permanencia medio aumenta de 0 a 3 segundos. Para cada valor del tiempo medio de interrupción, se ejecutan 100 simulaciones independientes, en cada una de las cuales se envía un fichero de 300 MB. Cabe señalar que el experimento se detiene cuando la aplicación recibe todos los bytes.

La Figura 5 muestra la distribución del retardo medio extremo a extremo y el rendimiento observado, a medida que se va incrementando el tiempo medio de interrupción en el enlace ISL. Como se podía prever, en la Figura 5a se puede observar que el retardo medio extremo a extremo aumenta de forma constante, y también lo hace su dispersión. A su vez, la Figura 5b muestra que el rendimiento disminuye como consecuencia tanto de la reducción de la capacidad debida a los tiempos de interrupción, como de la reacción del control de congestión ante dichas desconexiones temporales.

Por último, se ha configurado el enlace ISL con tráfico de fondo (TCP). Para simplificar la evaluación de los resultados obtenidos, en esta configuración no se tienen en cuenta las interrupciones. Por lo tanto, el enlace ISL se configura con una velocidad constante (funcionamiento normal del enlace punto a punto) de 50 Mbps. Se realiza un barrido del tráfico de fondo en el enlace ISL de 5 a 20 Mbps, realizando 100 ejecuciones independientes para cada configuración. De nuevo, cada ejecución conlleva la transmisión de 300 MB y sólo se detiene cuando se reciben todos los bytes. La Figura 6 muestra las distribuciones del retardo medio de extremo a extremo y el rendimiento a medida que se incrementa el tráfico de fondo.

En la Figura 6a se observa que el retardo extremo a extremo se mantiene bastante estable hasta que la tasa de tráfico de fondo alcanza los 10 Mbps. A partir de ese punto, el retardo aumenta constantemente, mostrando una variabilidad que no cambia de manera apreciable. Mientras tanto, en la Figura 6b se muestra un comportamiento diferente para el rendimiento, que se mantiene bastante estable, en torno a los 27 Mbps, hasta que la tasa de tráfico de fondo alcanza los 10 Mbps, disminuyendo a partir de ese punto. Cabría esperar que el caudal del flujo extremo a extremo con bajo tráfico de fondo, alcanzara un valor más cercano al promedio de los enlaces LMS (40 Mbps). Sin embargo, es importante señalar que la falta de adaptación de la ventana de congestión tiene un gran impacto en el rendimiento, como se observó en el análisis mencionado anteriormente, y esto es aún más acusado en presencia de dos enlaces LMS (enlace ascendente y enlace descendente).

Como se ha podido ver, la metodología propuesta permite acometer la evaluación de protocolos de capas

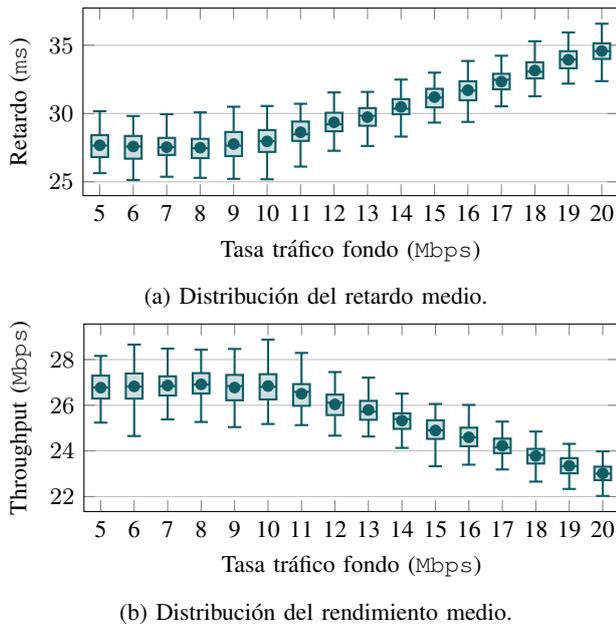


Fig. 6: Impacto del tráfico de fondo en el enlace ISL sobre las comunicaciones de extremo a extremo. Los resultados se obtienen a partir de 100 simulaciones para cada valor de tráfico de fondo.

altas sobre enlaces inalámbricos únicos y topologías más complejas, sin incurrir en un modelado muy detallado, que implicaría unos tiempos de simulación mucho más elevados. Así, aunque estas evaluaciones pueden realizarse utilizando modelos de simulación más precisos de las capas bajas (PHY, MAC) la complejidad subyacente aumentaría sustancialmente, y en diferentes circunstancias su impacto en los protocolos de capas altas podría no ser relevante. Además, la metodología ligera propuesta permite la interacción con tráfico real, utilizando ns-3 TAP. Por el contrario, las simulaciones con modelos muy precisos de la conectividad subyacente podrían no adaptarse a una ejecución en tiempo real (dependiendo de diferentes factores: complejidad del modelo, el hardware y el escenario), lo que dificultaría la interacción con aplicaciones e implementaciones de protocolos de transporte reales.

V. CONCLUSIÓN

La aparición de nuevas tecnologías inalámbricas y topologías de red de acceso hace que sea necesario evaluar el comportamiento los protocolos de capas superiores, tanto los más tradicionales, como nuevas soluciones que han ido apareciendo de manera más reciente. Aunque los emuladores de enlace se pueden utilizar para realizar este tipo de análisis (por ejemplo, los mecanismos de control de congestión), no están diseñados para reflejar la dinámica de las tecnologías de acceso y, en ocasiones, se limitan a escenarios más específicos. Por otro lado, la implementación detallada de procedimientos de capa baja (PHY y MAC) en los simuladores de red podría no tener un impacto significativo en el rendimiento de las soluciones de capas superiores, incrementando de manera

considerable el tiempo de simulación, limitando así la interacción con las aplicaciones reales. Como complemento a los enfoques de análisis existentes, en este trabajo se describe un esquema de simulación ligero que combina el simulador ns-3 con modelos teóricos de los canales subyacentes.

El enfoque descrito, que se ha puesto a disposición de la comunidad científica a través de un repositorio público, se basa en una modificación de la implementación original de la clase *point-to-point-device* en ns-3, y varias utilidades que simplifican la definición de escenarios con diferentes topologías y configuraciones, incluyendo la posibilidad de emular enlaces con desconexiones y compartidos.

Utilizando este enfoque, se ha utilizado una red LEO, utilizando modelos de capacidad basados en cadenas de Markov para reflejar el comportamiento de los dos tipos de enlace que la conforman. A continuación, se ha validado la metodología propuesta, analizando el rendimiento del protocolo TCP en diferentes configuraciones. El correcto funcionamiento de la implementación se ha validado inicialmente sobre un canal sintético. Posteriormente, se ha ampliado el estudio, utilizando modelos más realistas de enlaces LEO, propuestos en la literatura y adaptados para ser integrados en la herramienta que se ha desarrollado. En este sentido, el enfoque propuesto permite el despliegue de diferentes topologías y escenarios, que van desde enlaces únicos hasta redes extremo a extremo, que abarcan múltiples enlaces con tráfico de fondo y desconexiones.

Hay dos líneas de trabajo diferentes que se pretenden abordar en el futuro. Por un lado, se mejorará la operación de la implementación propuesta, habilitando la definición de modelos de canal mediante archivos de configuración. Esto permitirá personalizar la configuración de cada uno de los enlaces, incluso los que sean del mismo tipo, con tiempos de permanencia, probabilidades de transición y capacidades diferenciadas. Por otro lado, se aprovechará la metodología de análisis propuesta para estudiar el comportamiento de otros protocolos de transporte, en particular QUIC, así como para proponer técnicas que mejoren su rendimiento.

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] M. Polese, R. Jana, and M. Zorzi, "Tcp and mp-tcp in 5g mmwave networks," *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 5, pp. 12–19, 2017.
- [2] F. Y. Yan, J. Ma, G. D. Hill, D. Raghavan, R. S. Wahby, P. Levis, and K. Winstein, "Pantheon: the training ground for Internet congestion-control research," in *2018 {USENIX} Annual Technical Conference ({USENIX} {ATC} 18)*, 2018, pp. 731–743.

- [3] R. Netravali, A. Sivaraman, K. Winstein, S. Das, A. Goyal, and H. Balakrishnan, "Mahimahi: A lightweight toolkit for reproducible web measurement," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 44, no. 4, p. 129–130, aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2740070.2631455>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] C. Hervella, L. Diez, F. Fernández, N. J. Hernández Marcano, R. Hylsberg Jacobsen, and R. Agüero, "Realistic assessment of transport protocols performance over leo-based communications," ser. PE-WASUN '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 91–98. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3551663.3558680>
- [8] L. Rizzo, "Dummysnet: a simple approach to the evaluation of network protocols," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 27, no. 1, pp. 31–41, 1997.
- [9] S. Hemminger *et al.*, "Network emulation with NetEm," in *Linux conf au*, vol. 844. Citeseer, 2005.
- [10] N. Handigol, B. Heller, V. Jeyakumar, B. Lantz, and N. McKeown, "Reproducible network experiments using container-based emulation," in *Proceedings of the 8th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, 2012, pp. 253–264.
- [11] A. Varga, "OMNeT++," in *Modeling and tools for network simulation*. Springer, 2010, pp. 35–59.
- [12] G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 network simulator," in *Modeling and Tools for Network Simulation*, K. Wehrle, M. Günes, and J. Gross, Eds. Springer, 2010, pp. 15–34. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/books/collections/Wehrle2010.html#RileyH10>
- [13] 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.
- [14] 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.