

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE BBR EN REDES 4G

Alumno: Ozaita Araico, Guillermo Carlos

Directora: Liberal Malaina, Fidel

Curso: 2017-2018

Fecha: Bilbao, 17 de Julio de 2018

Índice

Lista de tablas	4
Lista de figuras	5
1. Introducción	7
2. Contexto	8
3. Objetivos y alcance	9
4. Beneficios del proyecto	10
5. Análisis del estado del arte	11
5.1. Desarrollo de los protocolos de control de congestión	11
5.2. TCP en redes móviles	12
5.3. Limitaciones del entorno móvil	13
5.4. Parámetros de medida	14
5.5. Diferencias principales entre protocolos	14
5.5.1. Inicio de la conexión	14
5.5.2. Punto de trabajo	15
5.6. Funcionamiento de BBR	17
5.7. Conclusiones del estado del arte	18
6. Descripción de la solución propuesta	20
6.1. Maqueta de pruebas	20
6.2. Diseño de pruebas	21
6.2.1. Pruebas estáticas	21
6.2.2. Pruebas dinámicas	22
7. Descripción de fases y tareas	23
7.1. Fases del proyecto	23
7.2. Definición de tareas	24

7.2.1. Investigación	24
7.2.2. Definición del plan de pruebas	24
7.2.3. Realización de pruebas	25
7.2.4. Redacción de la memoria	27
8. Diagrama de Gantt	28
9. Algoritmos	30
10.Análisis de Resultados	32
10.1. Pruebas estáticas	32
10.2. Pruebas dinámicas	39
10.3. Conclusiones del análisis	40
11.Resumen de costes	43
12.Conclusiones	44
Bibliografía	45
Anexo I: Plan de Pruebas	47

Resumen Abstract Laburpena

BBR es un nuevo algoritmo de control de congestión desarrollado por Google. A diferencia de los protocolos tradicionales que se basan en la pérdida de paquetes como señal de congestión, BBR estima la capacidad del canal disponible para determinar la cantidad de datos que enviar. BBR trata de mejorar el uso del canal evitando la creación de colas en los enlaces de menor capacidad. En la publicación original de BBR se muestra un mejor rendimiento en topologías estáticas frente a TCP CUBIC. Ante la falta de información acerca de cómo se comporta en entornos móviles, este proyecto trata de evaluar el rendimiento de BBR en redes LTE.

Palabras Clave: Algoritmo de control de congestión, BBR, LTE.

BBR is a new congestion control algorithm developed by Google. Instead of using packet loss as congestion signal, like many currently used congestion control algorithms, BBR estimates the available bandwidth in bottleneck links in order to determinate its sending rate. It tries to provide high link utilization while avoiding queues creation in bottleneck buffers. The original publication of BBR shows that it can deliver superior performance in static environments compared to CUBIC TCP. In the absence of information about how it behaves in mobile environments, this project tries to evaluate the performance of BBR in LTE networks.

Keywords: Congestion control algorithm, BBR, LTE.

BBR Googlek garatutako kongestio kontrol algoritmo berria da. Kongestio seinale bezala paketeen galeran oinarritzen diren ohiko protokoloak ez bezala, BBR-k kanal erabilgarriaren gaitasuna estimatzen du, bidaliko den datu kantitatea zehazteko. BBR kanalaren erabilera hobetzen saiatzen da, gaitasun txikiko loturetan ilaren sorkuntza saihestuz. BBR-ren argitalpen originalak erakusten du, topologia estatikoan, TCP CUBIC bezalako ohiko protokoloen aurrean errendimendu hobegoa duela. Ingurune mugikorretan BBR-ren portaerari buruzko informazio falta dela eta, proiektu honek, BBR-ren errendimendua LTE sareetan ebaluatzen ahalegintzen da.

Gako-hitzak: Kongestio kontrol algoritmoa, BBR, LTE.

Lista de tablas

1.	Tarea 1. Análisis de publicaciones previas	24
2.	Tarea 2. Análisis de objetivos	24
3.	Tarea 3. Análisis de las limitaciones del entorno móvil	24
4.	Tarea 4. Definición de entornos de pruebas	25
5.	Tarea 5. Elección de la plataforma de pruebas	25
6.	Tarea 6. Configuración de la plataforma de pruebas	25
7.	Tarea 7. Realización de pruebas en entornos estáticos	25
8.	Tarea 8. Realización de pruebas en entornos dinámicos	26
9.	Tarea 9. Comprobación de resultados	26
10.	Tarea 10. Post-procesado de resultados de las pruebas	26
11.	Tarea 11. Documentación del proyecto	27
12.	Tarea 12. Supervisión del proyecto	27
13.	Distribución total de horas	28
14.	Presupuesto. Horas internas	43
15.	Presupuesto. Amortizaciones	43
16.	Presupuesto. Resumen	43
17.	Ejemplo 1: Formulario entregado tras la realización de una prueba estática	47
18.	Ejemplo 2: Formulario entregado tras la realización de una prueba en movimiento	48
19.	Ejemplo 3: Formulario entregado tras la realización de una prueba en movimiento	48
20.	Calendario de pruebas estáticas con 20 dB de SINR	49
21.	Calendario de pruebas estáticas con 10 dB de SINR	50
22.	Calendario de pruebas dinámicas con movimiento del UE hacia del eNB . .	51
23.	Calendario de pruebas dinámicas con movimiento del UE alejándose del eNB.	52

Lista de figuras

1.	Ejemplo de cuello de botella	8
2.	Punto de trabajo de los CCAs	16
3.	Funcionamiento de BBR	18
4.	Maqueta de pruebas	21
5.	Situaciones estáticas.	22
6.	Situaciones de movimiento	22
7.	Diagrama de Gantt	29
8.	Flujo de la prueba	31
9.	Resultados de las pruebas estáticas con BBR	34
10.	Resultados de las pruebas estáticas con CUBIC	35
11.	Resultados de las pruebas estáticas con CUBIC	36
12.	Evolución de las comunicaciones de BBR ante distintos fading	37
13.	Evolución de las comunicaciones de Cubic ante distintos fading	38
14.	Evolución de las comunicaciones de New Reno ante distintos fading	38
15.	Evolución de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad	39
16.	Evolución de las conexiones TCP con CUBIC en situaciones de movilidad	39
17.	Evolución de las conexiones TCP con New Reno en situaciones de movilidad	40
18.	Evolución del goodput de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad	41
19.	Evolución del goodput de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad	42

Lista de acrónimos

3G Third generation

4G Fourth generation

ACK Acknowledgement

AIMD Additive Increase Multiplicative Decrease

AQM Active Queue Management

BBR Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time

BDP Bandwidth-delay product

CCA Congestion Control Algorithm

CWND Congestion Window

eNB Evolved Node B

EVA Extended Vehicular A

HST High Speed Train

IoT Internet of Things

IP Internet Protocol

LTE Long Term Evolution

IP Internet Protocol

RTT Round-Trip delay Time

TCP Transmission Control Protocol

TFG Trabajo de Fin de Grado

UE User Equipment

1. Introducción

En la actualidad la sociedad hace mayor uso de Internet que nunca, principalmente por el constante empleo de dispositivos móviles. Gracias a ellos la conexión es posible prácticamente desde cualquier lugar. No obstante, en sus principios Internet fue pensado para interconectar redes fijas y es, por tanto, necesario adaptarlo a las características de las redes móviles. La gran mayoría de las comunicaciones siguen utilizando los protocolos tradicionales TCP/IP que ya no son capaces de cubrir las necesidades que van apareciendo con la llegada de las redes móviles. Por todo ello, se ve necesario adaptar estos protocolos a las necesidades actuales.

Las redes móviles y las redes fijas cuentan con notables diferencias, la principal siendo la variabilidad inherente a las comunicaciones móviles. Un gran número de factores como la movilidad, las interferencias o el número de clientes en una misma celda afectan a la calidad de la comunicación. Las conexiones TCP tradicionales no pueden lidiar de una forma efectiva con esta variabilidad ya que no están diseñadas para ello. Adaptarse a los recursos del canal disponibles en cada momento no es un tema con solución evidente ni en topologías estáticas. Estas problemáticas impiden o reducen la eficiencia de los mecanismos tradicionales presentes en TCP.

Con el tiempo, se han ido desarrollando diferentes protocolos de control de congestión, cada uno de ellos centrados en diferentes aspectos de la comunicación. A pesar de las modificaciones presentes para reducir el impacto que tiene la movilidad, el rendimiento de las redes móviles cuenta con margen de mejora. Se considera por ello de gran importancia adaptar estos mecanismos a las necesidades actuales, realizando las mejoras necesarias o bien sustituyéndolos por unos que proporcionen un mejor rendimiento.

Recientemente Google ha desarrollado el protocolo de control de congestión BBR, el cual tiene como objetivo poner fin a los problemas tanto de las redes fijas como de las redes móviles. Este trabajo trata de analizar su rendimiento en redes LTE en situaciones de movilidad. Para ello se tendrán en cuenta los resultados de estudios realizados con anterioridad acerca de cómo se comportan otros protocolos de TCP en redes LTE.

2. Contexto

El principal propósito de TCP es proveer fiabilidad a una comunicación a pesar de estar sustentada por protocolos no confiables como puede ser el protocolo IP. TCP añade una serie de mecanismos para garantizar la correcta entrega de los datos, mecanismos que son capaces de estimar las condiciones del enlace en tiempo real, ofreciendo soluciones adaptadas a cada situación.

Tradicionalmente, los mecanismos de control de congestión se han basado en la pérdida de paquetes. La pérdida de un paquete se relaciona con una congestión leve y la pérdida de tres paquetes con una congestión severa. Tras estos eventos la velocidad de la transmisión se ve reducida. Puede que en algún momento de la historia de Internet esta equivalencia fuera acertada, sin embargo, con el desarrollo de la tecnología ha dejado de serlo. Esto se debe a que en la actualidad se disponen de velocidades y colas con capacidades de almacenamiento muy superiores a las disponibles años atrás. Este enfoque de control de congestión ha derivado en el problema conocido como *bufferbloat*. Este efecto se produce cuando los paquetes quedan almacenados en colas sobredimensionadas durante un gran periodo de tiempo, aumentando en exceso la latencia.

TCP es un protocolo orientado a conexión por lo que se encarga de establecer un canal extremo a extremo y de asegurar la transferencia fiable de datos. Este canal estará formada por varios enlaces con características diferentes pero que se comportan a nivel lógico como uno solo. El enlace que cuente con menor capacidad será el cuello de botella que limita a la hora de transmitir. Se llama cuello de botella puesto que dispone de una velocidad de procesamiento inferior a la tasa de llegada. Como consecuencia los paquetes no procesados se almacenarán en su búfer, creando así situaciones de congestión. Al prolongarse esta situación en el tiempo, se llegará al evento de pérdida de paquetes previamente comentando. En el caso de los enlaces no limitantes, todos ellos cuentan con una velocidad de salida mayor que velocidad de entrada, por lo que en ellos no se forman colas de paquetes pero funcionarán por debajo de sus capacidades. BBR se centra en esta situación. Este nuevo CCA tiene como objetivo principal la reducción de la latencia en las comunicaciones mediante la eliminación del efecto del *bufferbloat* en la conexión.

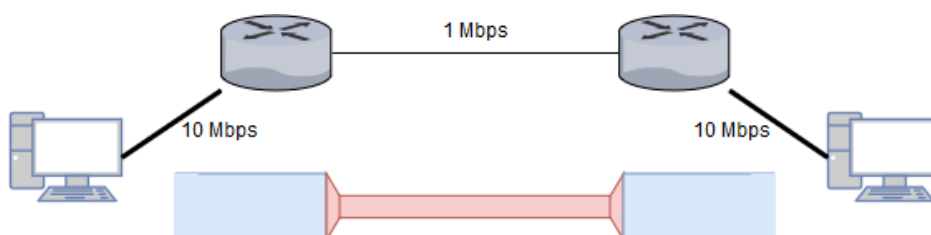


Figura 1: Ejemplo de cuello de botella

3. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es el de **analizar el rendimiento de BBR en redes móviles**, más concretamente en redes LTE, logrando una mejora en el rendimiento de las comunicaciones y proponiendo aspectos de mejora para el protocolo en este tipo de entornos. Para alcanzar esta meta, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

Definición de parámetros de medida Para ser capaces de medir de una forma objetiva el rendimiento de la comunicación, es necesario identificar los parámetros representativos de la calidad. Los resultados medidos por estos parámetros servirán para identificar las diferencias entre BBR y los otros protocolos de control de congestión.

Identificación de aspectos negativos para la comunicación Es necesaria la detección de las posibles fuentes de error que puedan afectar a la comunicación puesto que éstos pueden activar los mecanismos de control de flujo. Es vital identificar las posibles limitaciones del entorno móvil que puedan deteriorar la calidad de experiencia de los usuarios. Una vez conocidos los efectos que éstos pueden tener sobre la comunicación, se podrá razonar en un ejercicio académico el comportamiento que deberá adquirir el CCA para minimizar su impacto.

Toma de medidas Se considera fundamental la toma de medidas de los parámetros previamente definidos durante conexiones reales. Los resultados se deben almacenar para poder realizar un posterior procesamiento de los datos. Una vez procesados, se podrán cuantificar las diferencias entre BBR y los demás protocolos.

Impacto de diferentes escenarios de movilidad en la comunicación Acercándonos lo máximo posible a un entorno real, es importante analizar el rendimiento y la capacidad de reacción de los diferentes CCAs bajo situaciones de movilidad para ser capaces de comprender las limitaciones que suponen. Una correcta comprensión de la movilidad puede beneficiar de un modo directo el posterior análisis de los datos.

Comparación entre CCA Uno de los aspectos fundamentales de este proyecto es la comparación de rendimiento de BBR frente a otros CCA tradicionales. Se realizarán las mismas pruebas tanto para BBR como para TCP Cubic y New Reno de modo que se pueda comparar los aspectos en los que difieren cada uno de ellos.

4. Beneficios del proyecto

A finales de 2017 el número de teléfonos móviles alcanzó la cifra de 5.000 millones, es decir, un grado de penetración del 66 % de la población mundial[1]. Estudios estiman que este número aumentará hasta llegar a los 5.900 millones para el año 2025[2]. Con el paso de los años los requisitos de las conexiones son cada vez más exigentes. Además, la llegada del IoT supone una carga añadida. Por todo ello podemos concluir que el peso de las comunicaciones móviles no para de crecer. Por esta razón, la mejora en la eficiencia en estas comunicaciones puede suponer una gran avance tanto para las operadoras como para los usuarios.

El funcionamiento de TCP sobre las redes móviles es un tema complejo, tanto que sigue siendo objeto de estudio y continúa en constante evolución. La gran mayoría de los estudios han sido enfocados en la obtención de parámetros para cuantificar el rendimiento de las comunicaciones, sin embargo, pocos se han planteado situaciones de movilidad. Este tipo de situaciones son especialmente desafiantes dado que la variabilidad que presentan es perjudicial para la comunicación. Se toman estas investigaciones como referencia y se intenta ampliar su alcance, enfocando el proyecto al comportamiento de BBR en situaciones de movilidad. Se trata de ampliar el conocimiento que la **comunidad académica** dispone de este nuevo protocolo como consecuencia de la falta de información sobre su comportamiento en este tipo de situaciones.

La investigación en este campo puede resultar de especial interés para las **operadoras**. Habitualmente empresas de telefonía como Telefónica o Vodafone pagan a terceros para analizar el rendimiento de sus infraestructuras. Año tras año se plantean objetivos a realizar con el fin de poder mejorar sus servicios. Estas mejoras se deben fundamentalmente al trabajo de investigación que se realizan para definir mediciones que puedan modelar el comportamiento de las transmisiones móviles. Estas acreditaciones tienen gran valor para ellas, dado que pueden suponer una diferenciación entre empresas. Como ejemplo de estudios similares tenemos a la publicación inicial de BBR. En ella Google muestra cómo se comporta este protocolo en un entorno real. Su implementación muestra una mejora de rendimiento en sus servicios de Youtube [3].

La realización de este tipo de proyectos también beneficia directamente a los **usuarios**. Actualmente el tráfico que se mueve por Internet lo hace con un nivel de latencia mejorable y no se consiguen alcanzar las velocidades máximas disponibles. Gracias a las investigaciones realizadas en este campo somos capaces de encontrar soluciones a estas problemáticas que sufren los usuarios. Este tipo de soluciones puede ser también aprovechadas por **la comunidad de desarrolladores de aplicaciones** para ofrecer a los usuarios servicios con menor latencia y mejores prestaciones. Es por ello necesario investigar si BBR puede realmente suponer una mejora en la infraestructura móvil, mejorando de forma global la experiencia del usuario final.

5. Análisis del estado del arte

5.1. Desarrollo de los protocolos de control de congestión

A lo largo de la historia se han propuesto una gran variedad de algoritmos de control de congestión para la transmisión de datos en Internet, cada uno de ellos introduciendo mejoras en distintos aspectos. En función de sus características se pueden identificar tres grupos [4, 5]:

1. Los primeros protocolos TCP se pueden clasificar como soluciones **basadas en pérdidas**. Utilizan mecanismos AIMD que detectan una posible congestión en la red mediante los eventos de pérdidas de paquetes. El ejemplo más conocido en la actualidad es **New Reno** que, a pesar de contar con un notable rendimiento en redes fijas, no se adapta rápidamente a las condiciones variables del entorno móvil. Este, al ser uno de los primeros, ha servido de referencia para la creación de todos los demás algoritmos. De este modo se desarrolla **TCP CUBIC**, el cual cuenta con pequeñas modificaciones respecto al anterior para mejorar su funcionamiento en situaciones de más alta velocidad tanto en redes fijas como en redes móviles. Es una evolución de su predecesor BIC y mejora notablemente el rendimiento de TCP en enlaces de altas capacidades. Las mayores diferencias respecto a New Reno se encuentran en el inicio de la conexión. Actualmente, CUBIC cuenta con un gran peso, siendo utilizado por defecto en una gran cantidad de sistemas.
2. El siguiente grupo se puede clasificar como **basados en pérdidas con estimación de ancho de banda**. Se trata de otro avance más en este tipo de protocolos basados en pérdidas. Como mejora, intentan caracterizar el enlace para ajustar la comunicación a su capacidad, reduciendo de este modo el número de pérdidas.
3. Existen otros algoritmos que introducen modificaciones a los protocolos de control de congestión tradicionales. El más reciente de ellos es **BBR** que se puede clasificar como **basado en latencia con estimación de ancho de banda**. Trata de mejorar el rendimiento de las transmisiones principalmente reduciendo *bufferbloat* y aprovechando al máximo las capacidades del canal. BBR, frente a los demás algoritmos, propone un nuevo enfoque para la detección de la congestión, evitar el aumento de latencia producido por el enconchado. Toma como medidas de referencia la mínima latencia del canal lógico, tratando de transmitir sin aumentarla. Durante el tiempo de vida de la conexión se efectúan pruebas periódicas para seguir monitorizando el estado de la conexión. Para el correcto funcionamiento de BBR se necesita disponer de un regulador de colas AQM que cuente con la característica conocida como *padding*, distribuyendo la carga de una forma uniforme en el tiempo. En la actualidad el protocolo BBR es objeto de una gran cantidad de estudios para detallar su comportamiento en diferentes entornos.

5.2. TCP en redes móviles

En el estudio de la movilidad y su impacto en la capa de transporte hay ciertas características que deben mencionarse. Por un lado, las redes móviles cuentan con una mayor variabilidad que las redes fijas en las condiciones del enlace, lo que puede derivar en una degradación del throughput. Comparando distintas tecnologías de redes móviles existen también importantes diferencias, en particular entre las **redes 3,5G y las redes 4G**. Estas últimas, pese a tener capacidades de transmisión superiores a las redes 3,5G, no son capaces de aprovecharla en su totalidad. La gran variabilidad del enlace es un impedimento para que TCP pueda adaptarse adecuadamente a cada situación y sacar el máximo aprovechamiento[6]. Como ya se ha mencionado, las **redes fijas y las redes móviles** cuentan con notables diferencias, no obstante, también cuentan con similitudes. Pruebas realizadas sobre flujos TCP en estaciones base con un número reducido de usuarios muestran resultados muy similares a los realizados en redes fijas. Asimismo, se conoce que, al igual que las redes fijas, las redes móviles sufren el efecto del *bufferbloat* comentado previamente [7].

La naturaleza del tráfico móvil provoca incrementos repentinos que cargan la red, varían el throughput y aumentan la latencia de las comunicaciones[8]. Ante estas situaciones TCP experimenta una gran cantidad de vencimientos de temporizadores, eventos especialmente dañinos. Este suceso da lugar a largos periodos de tiempo en los que el canal está en desuso. Una vez excedido el temporizador comienza la retransmisión de los paquetes perdidos y se retoma la comunicación a un ritmo inferior. Del mismo modo, existen otros eventos que añaden variabilidad a la comunicación que son la modulación del enlace y el movimiento del usuario. La movilidad del usuario provoca que la transmisión por el enlace inalámbrico se vea alterada, pudiendo causar pérdidas y retransmisiones si la comunicación no se adapta correctamente a las condiciones del enlace.

Debido al poco tiempo de vida de BBR, aún no se conoce cómo se comporta frente a estas dificultades. Una de las grandes incógnitas es si será capaz de predecir con eficacia las futuras condiciones del enlace en situaciones del entorno real y si podrá hacerlo tan rápidamente como para alcanzar el máximo aprovechamiento del canal.

5.3. Limitaciones del entorno móvil

Para ser capaces de simular un entorno móvil real en las pruebas de rendimiento, es necesario identificar e implementar las limitaciones del entorno móvil que puedan perjudicar a un flujo TCP. Tomando como punto de partida el trabajo de Atxutegui et al. [4], se muestra un análisis de las posibles causas que afectan al potencial de los CCAs en cuanto a la obtención del máximo throughput y aprovechamiento de la capacidad del enlace. Posteriormente, estos aspectos se trasladarán al diseño de las pruebas con la finalidad de replicar de un modo fiable el comportamiento de los protocolos.

Impacto de la latencia En las redes móviles, a diferencia de las redes fijas, la latencia puede variar en gran medida. Teniendo presente que una de las características más destacadas de BBR en cuanto a funcionamiento es el control de dicho parámetro, la alta variación de ésta puede influenciar su rendimiento. En topologías fijas, las condiciones de red no son tan cambiantes como para suponer un desafío en cuanto a adaptación, sin embargo, en redes móviles se cuenta con un mayor *jitter* e incluso puede haber momentos de gran latencia. Esto puede suponer un desafío para la adaptación de BBR. Por estas razones se debe estudiar en qué medida influye este aspecto en el comportamiento de éste CCA.

Impacto de la movilidad Un factor de gran peso que diferencia las redes móviles de las redes fijas es la libertad de desplazamiento del UE. Esta movilidad produce cambios en el enlace inalámbrico que repercuten la eficiencia de las conexiones TCP de forma negativa [9]. La movilidad de la Estación de Usuario se puede traducir como una variación en la relación Señal a Ruido (SNR). Un alejamiento de la estación base supone una disminución del SNR mientras que, si el dispositivo se acerca a la estación base, este aumenta. BBR tiene que ser capaz de detectar rápidamente un deterioro o una mejora del canal y adaptar el flujo de transmisión. Es importante destacar que TCP tradicionalmente ha tenido problemas a adaptarse a las fluctuaciones del medio inalámbrico y se desea saber si BBR supone un avance en este aspecto.

Impacto de la velocidad La inestabilidad de los enlaces inalámbricos frente a los cableados es un hecho conocido. Las interferencias hacen que las condiciones del enlace fluctúen constantemente. La velocidad de desplazamiento del UE es un factor importante a tener en cuenta puesto que aumenta la variabilidad que tanto caracteriza a este tipo de redes [4, 10, 11]. Al igual que la movilidad y la latencia, la velocidad añade complejidad al estudio de una conexión TCP y se debe tener en cuenta.

Estado del eNodeB El estado del eNodeB puede tener gran impacto en la comunicación. Una celda LTE puede dar servicio a una gran cantidad de usuarios. Dependiendo del número de UEs en una misma celda, el eNB debe repartir el ancho de banda entre ellos de una forma equitativa puesto que todos ellos comparten un mismo enlace radio[12]. Como se puede observar, el estado del eNB tiene un impacto directo en la capacidad del enlace disponible. Además, los flujos TCP de otros usuarios pueden tener efectos negativos sobre las demás. Por otro lado, una estación base puede estar en situación de congestión lo que afecta a todos los usuarios a los que da servicio, a pesar de no ser ellos los causantes de dicha situación.

5.4. Parámetros de medida

El rendimiento de TCP en redes LTE ha sido investigado en numerosas ocasiones. En cuanto a trabajos para medir el rendimiento de TCP en redes LTE, el estudio realizado por Huang et al. [13] efectúa mediciones de throughput y de RRT. Otro proyecto semejante ha sido llevado a cabo por Garcia et al. [14], el cual mide el rendimiento de TCP en redes móviles de diferentes operadoras Suecos y analiza la variación de throughput y latencia.

A diferencia de estos trabajos, existen algunas investigaciones que realizan mediciones del impacto de la movilidad en redes LTE. Merz et al. [10] ha realizado estudios en situaciones de 200 km/h en los cuales la principal métrica era la eficiencia espectral y la comparación de recursos de la celda entre usuarios. También Huang et al. [15] ha llevado a cabo investigaciones en situaciones de movilidad donde se centraba en el throughput y RRT del uplink y el downlink y la variación entre ellos en un mismo día.

Los artículos que más se corresponden con nuestro trabajo son los realizados por Atxutegui et al. [4, 9]. En ellos se efectúan diferentes estudios del comportamiento de distintos algoritmos de control de congestión en situaciones de movilidad y se presta especial atención al comportamiento de los mismos al inicio de la conexión. Para ello los principales parámetros que se analizan son el throughput, el número de paquetes en vuelo, la evolución de la ventana *cwnd*, el rtt y el número de retransmisiones. El trabajo realizado tendrá en cuenta todos ellos, especialmente éstos últimos, para realizar una correcta medida de los diferentes CCAs.

5.5. Diferencias principales entre protocolos

A lo largo del tiempo se han desarrollado distintas versiones de TCP. En este proyecto se va a comparar a BBR con dos de las más utilizadas, TCP CUBIC y New Reno. A continuación se muestran de forma detallada las diferencias más destacables entre los protocolos.

5.5.1. Inicio de la conexión

Cada uno de los tres protocolos de control de congestión mencionados, New Reno, Cubic y BBR, cuentan con mecanismos específicos al inicio de la conexión:

New Reno [16] New Reno hace uso del conocido mecanismo Slow-Start para detectar cual es el máximo volumen de datos que puede soportar la red. Este mecanismo es conocido por el bajo rendimiento que ofrece en redes con altas capacidades de transmisión. Debido a su crecimiento exponencial se sobrepasa ampliamente la capacidad soportada por la red y, como consecuencia, se producen una gran cantidad de pérdidas. Han sido propuestas diferentes soluciones para evitar este efecto, por ejemplo limitar el tamaño de ventana en enlaces en los que se conozca este comportamiento.

CUBIC [17, 18] CUBIC dispone de un mecanismo alternativo conocido como Hybrid Slow-Start. Este mecanismo tiene en cuenta el número de paquetes en vuelo para intuir la congestión de la red. Su funcionamiento es similar al Slow-Start tradicional, con la diferencia que el crecimiento es más lento a medida que se acerca al valor de ventana máximo. Esta región se considera conflictiva puesto que existe peligro de

desbordar la capacidad del enlace, causando pérdidas de paquetes. De esta manera se consigue mejorar el rendimiento en redes de altas capacidades, aunque sigue teniendo problemas en redes móviles.

BBR [19, 20] BBR utiliza un nuevo mecanismo en la fase de inicio cuyo comportamiento se asemeja al de Slow-Start tradicional. El objetivo de este método es el de buscar un punto de salida de la fase Slow-Start antes de que se produzcan pérdidas graves. Para ello hace uso de los tiempos de llegada de los ACKs y del RTT. La diferencia radica en que esta fase de inicio llega a su fin cuando no se consigue un aumento de throughput mayor del 25 % en tres RTTs consecutivos. Es entonces cuando el protocolo intuye que se ha alcanzado el máximo de capacidad y deja de inyectar paquetes en la red. De este modo, trata de evitar la creación de colas con el fin de disminuir el impacto de la latencia en la comunicación.

5.5.2. Punto de trabajo

Una de las diferencias más destacadas entre los tres CCAs estudiados son sus puntos de trabajo, cómo detectan la congestión y cómo actúan cuando ésta es detectada [21]. Tanto New Reno como CUBIC tratan de poner en vuelo el máximo número de paquetes sin llegar a tener pérdidas. Al inicio de la conexión, sus flujos de datos aumentan por cada paquete confirmado (Additive Increase) de modo que la ventana crece hasta llenar las colas intermedias, esto provoca un incremento considerable en la latencia. Una vez llegados a la capacidad estimada de la red, la ventana aumenta paulatinamente hasta que se producen pérdidas. A partir de este momento los CCAs son capaces de detectar cuáles son los paquetes perdidos y desencadenan los mecanismos de control de congestión y recuperación de paquetes. Consecuentemente, se reduce la ventana (Multiplicative Decrease) para poder aliviar la congestión de la red. Una vez finalizados los mecanismos, vuelve a comenzar todo el proceso.

BBR en vez de detectar la congestión mediante las pérdidas de paquetes, la detecta en base a la latencia. Se toman unos valores del RTT que se utilizan como referencia para determinar si se están inyectando más tráfico del que puede soportar la red. Durante todo el tiempo de vida de la conexión se compara el RTT de referencia con el valor actual de la conexión. De este modo, se relaciona directamente el aumento del RTT con la creación de colas intermedias y con la congestión. Al transmitir evitando la creación de colas, BBR es capaz de evitar situaciones de congestión y ofrecer un flujo constante de datos.

Su principio de funcionamiento se basa en evitar la acumulación de paquetes en los búfer intermedios de la comunicación. Como se puede observar en la imagen 2 [3, 21], los protocolos New Reno y CUBIC, a pesar de poner un mayor número de paquetes en vuelo, no consiguen una superior tasa de llegadas frente a BBR. Aunque de forma teórica todos los CCAs cuentan con la misma tasa de llegadas, se debe tener en cuenta que BBR cuida la latencia, evitando el *bufferbloat*. Como resultado de este nuevo punto de trabajo se consigue un mayor aprovechamiento de la capacidad de los enlaces, con una transmisión constante en el tiempo, gracias a evitar situaciones de congestión.

Los dos enfoques pueden no tener grandes diferencias a bajas velocidades, sin embargo, es en los enlaces de altas capacidades y en situaciones de gran variabilidad donde estas diferencias se hacen más notables.

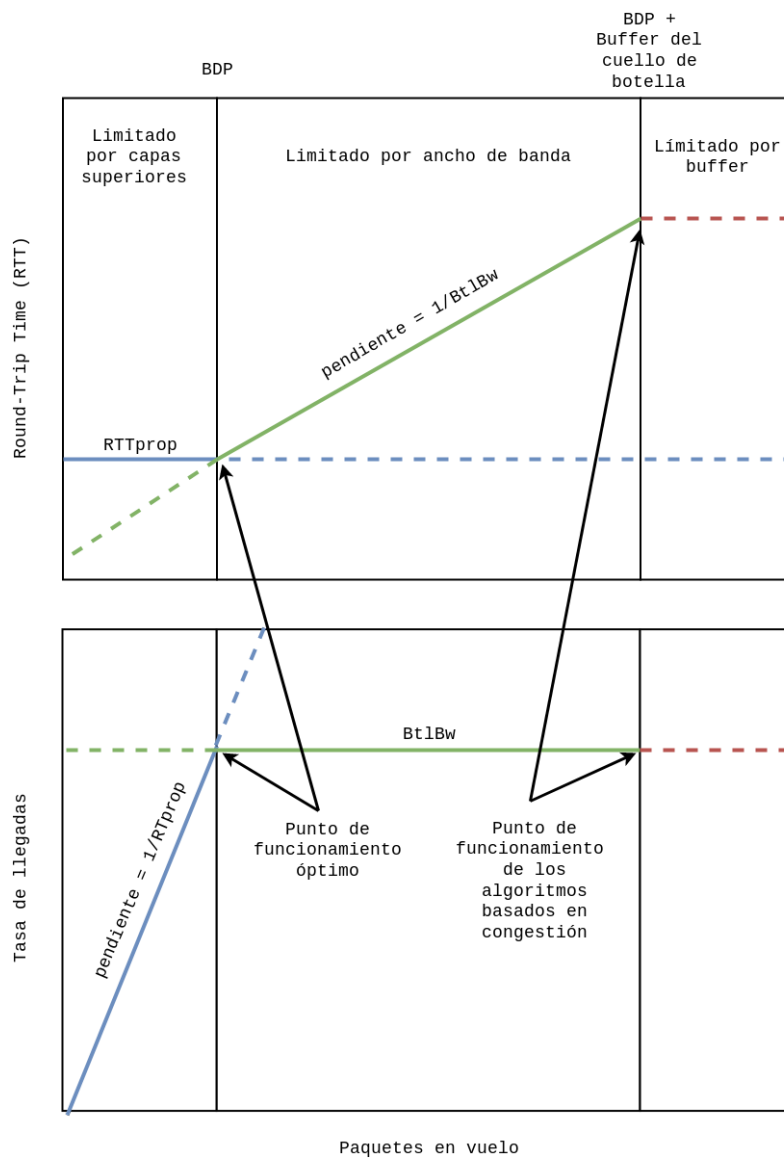


Figura 2: Punto de trabajo de los CCAs

5.6. Funcionamiento de BBR

BBR aspira alcanzar el punto de funcionamiento óptimo de la conexión, es decir, transmitir a máxima velocidad con el mínimo RTT. Para ello los principales objetivos de BBR son la eliminación del efecto *bufferbloat* y el aprovechamiento total del canal. Gracias a la eliminación de colas intermedias se procura transmitir induciendo el menor retardo posible. De este modo BBR evita tanto las situaciones de pérdidas como las situaciones de congestión, aspirando a alcanzar la totalidad de la capacidad disponible en el canal.

Dado que el estado de la conexión varía en el tiempo, se deben calcular constantemente una serie de parámetros. Los más destacados son RTprop y BtlBw. RTprop hace referencia al RTT mínimo de la comunicación y BtlBw a los paquetes en vuelo [22]. Para ello BBR cuenta con diferentes estados:

Start Consiste en la fase inicial comentada en el apartado anterior en la cual se miden las características del enlace.

Drain Tras la fase inicial comienza la fase de drenado. Su fin es eliminar el exceso de carga que se haya podido inducir en las colas intermedias durante la fase de inicial, reduciendo la cantidad de información que se transmite.

Probe BW Esta fase es la que mayor peso tiene durante la conexión, supone el 98 % del tiempo de la conexión. Cuenta con ocho estados cíclicos que tienen como objetivo principal la transmisión de la información aprovechando el 100 % de la capacidad estimada del canal. Periódicamente, durante uno de los 8 estados se procura sobrecargar la red enviando al 125 % de la capacidad, para comprobar si han cambiado las condiciones del enlace. Como consecuencia de esto, el estado inmediatamente posterior alivia la congestión causada enviando con una tasa del 75 %. A menos que las condiciones del canal hayan variado, durante el resto de los 6 estados se transmitirá al 100 % de la capacidad medida del canal.

Probe RTT La fase Probe-RTT toma lugar aproximadamente cada 10s y tiene una duración mínima de 200ms. Su función es comprobar que se está trabajando con el RTT más bajo posible. Para ello se pausa la comunicación casi en su totalidad hasta llegar a transmitir 4 paquetes, con el fin de volver a calcular el parámetro RTprop.

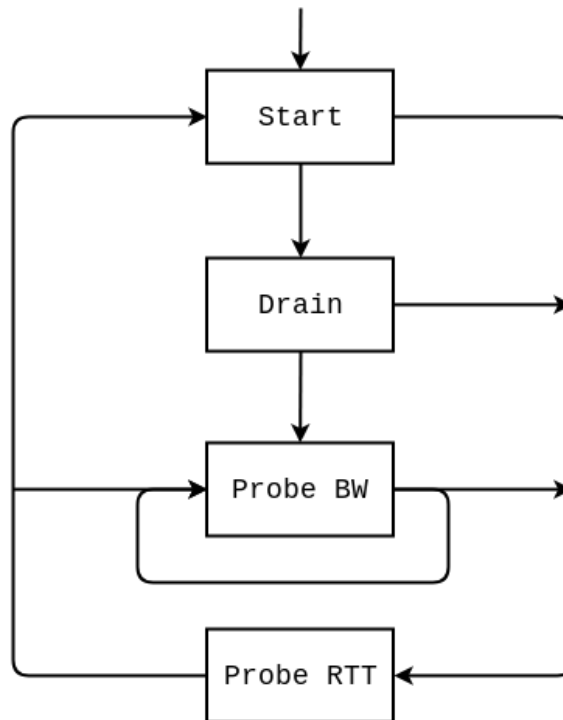


Figura 3: Funcionamiento de BBR

5.7. Conclusiones del estado del arte

El estudio quiere visualizar el impacto de las condiciones variables del entorno móvil en BBR. La variabilidad propia de los enlaces inalámbricos supone un desafío de adaptación para TCP. Además, el movimiento del UE puede agravar esta situación. En esta sección se pretende resumir el estado del arte y destacar las conclusiones:

- Para ser capaces de caracterizar el comportamiento de BBR en las redes móviles se tienen en cuenta estudios previamente realizados, haciendo especial hincapié en los **trabajos de Atxutegui et al. [4, 9]**, los cuales se toman como base a lo largo de toda la investigación. Los parámetros principales que se observan son el **goodput**, el **RTT**, **crecimiento de la ventana** y el **número de retransmisiones**.
- El protocolo TCP, al ser concebido para redes fijas, es necesario adaptarlo a las necesidades de las redes móviles. Tradicionalmente, los flujos TCP no han sido capaces de alcanzar rendimientos semejantes en este nuevo contexto. La naturaleza del tráfico móvil y las condiciones variables de estas redes perjudican el comportamiento de este protocolo. Existen algunos trabajos que estudian BBR en situaciones estáticas, pero no en condiciones de movilidad. Este trabajo toma como punto de partida estudios en situaciones móviles realizados para los CCAs tradicionales y trata de ampliarlos analizando el comportamiento de BBR en este entorno. **Debido a que no existen investigaciones acerca de su conducta en las redes móviles**, su rendimiento en estas situaciones es todavía una gran incógnita.
- BBR es un nuevo CCA desarrollado por Google cuyo funcionamiento sigue un planteamiento distinto al de los CCAs tradicionales. Para caracterizar su comportamiento se propone **comparar su rendimiento con New Reno**, por ser el CCA de punto

de partida para el desarrollo de todos los demás, **y CUBIC**, por ser el más usado en la actualidad. Como se ha explicado previamente, los protocolos New Reno y CUBIC **a pesar de poner un mayor número de paquetes en vuelo, no consiguen una superior tasa de llegadas frente a BBR**. Aunque de forma teórica todos los CCAs cuentan con la misma tasa de llegadas, se debe tener en cuenta que BBR cuida la latencia, evitando el *bufferbloat*. Como resultado de este nuevo punto de trabajo se consigue un mayor aprovechamiento de la capacidad de los enlaces, con una transmisión constante en el tiempo, gracias a evitar situaciones de congestión.

6. Descripción de la solución propuesta

6.1. Maqueta de pruebas

Para realizar la labor de comparación entre los CCAs tradicionales y BBR se ha decidido desplegar una maqueta que permita el estudio de dichos CCAs en un entorno LTE emulado. Teniendo el trabajo de Atxutegui et al. [4] como referencia se han valorado las diferentes ventajas y desventajas que presenta la emulación de una celda LTE frente a una simulación de la misma.

La principal ventaja de un entorno simulado es su fácil despliegue y su bajo coste. Sin embargo, los resultados que se obtienen se diferencian en gran medida con los del mundo real debido a varios factores, como por ejemplo la falta de simulación de protocolos, fading no realistas o el uso de UE virtuales.

Por otro lado, la emulación de un entorno LTE, a pesar de requerir mayores recursos, permite obtener valores más fieles a la realidad. Para esta tarea la maqueta desplegada cuenta con un Digital Radio Test o LTE-in-a-box. Este tipo de emuladores son capaces de crear la señal radio LTE y todos los protocolos necesarios para la comunicación entre el UE y el eNB a través de un cable RF o bien por el aire. Gracias a esto se permite medir con mucha más precisión el impacto de la variabilidad en la señalización y cómo TCP es capaz de reaccionar ante esta fluctuación. Finalmente la maqueta está formada por los siguiente componentes:

Cliente Dispositivo móvil Samsung Galaxy S III.

Servidor Servidor Linux que cuenta con los diferentes algoritmos de control de congestión.

Aeroflex 7100 Dispositivo de pruebas que emula la red LTE con capacidad de configuración de sus parámetros y registro.

Simulador de Colas Servidor intermedio utilizado para añadir latencia, acercándonos a situaciones reales.

Controlador Máquina de control centralizado de la maqueta desde donde se realizan las pruebas de una forma sincronizada.

Router Dispositivo para la interconexión entre redes.

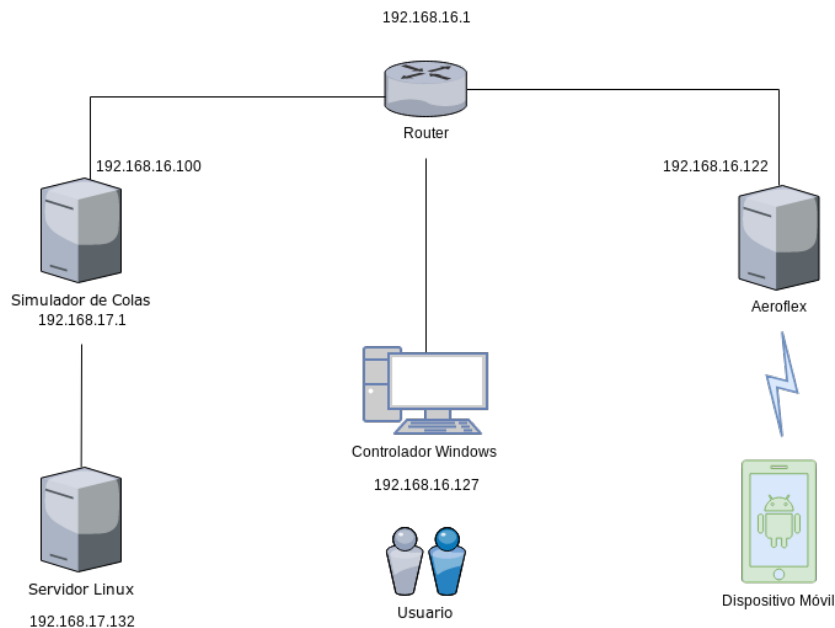


Figura 4: Maqueta de pruebas

6.2. Diseño de pruebas

Para analizar el rendimiento de BBR en redes móviles se ha diseñado un plan de pruebas. Estas pruebas irán incrementando en complejidad, añadiendo progresivamente nuevos factores y concluyendo con el impacto que cada uno de ellos tienen sobre el rendimiento. Para su realización se utilizará la maqueta expuesta previamente donde el UE dispondrá de una celda LTE dedicada. Se comenzará con situaciones estáticas debido a su menor complejidad y, una vez finalizadas, se continuará con las situaciones de movilidad. Las pruebas han sido diseñadas para poner a los CCA en situaciones límite para ser capaces de apreciar mejor sus diferencias.

6.2.1. Pruebas estáticas

Muestran el comportamiento de los CCAs en distintas situaciones. Los objetivos son conocer el efecto que la latencia tiene sobre BBR y la sensibilidad de los CCAs ante la variabilidad del enlace inalámbrico. Nos valemos de estos estudios para definir el comportamiento de los CCAs en una situación ideal antes de realizar las pruebas dinámicas. Estas nos servirán para medir el impacto que la movilidad pueda tener sobre la calidad de las conexiones TCP. Son planteadas de la siguiente forma:

1. Se mide la capacidad máxima que pueden alcanzar los CCA sin ningún factor negativo añadido.
2. La red cuenta con 50ms de latencia añadida, simulando una conexión a través de Internet, para visualizar el efecto que ésta tiene sobre la comunicación.
3. El enlace inalámbrico sufre el impacto de distintos fading que simulan la variabilidad típica de un enlace inalámbrico en diferentes situaciones.
4. Se realizan pruebas donde se dispone tanto de latencia añadida como de fading.

Todas las pruebas se plantean en dos situaciones diferentes en cuanto a la calidad del enlace inalámbrico. Primeramente se supone una situación favorable donde el UE dispone de un enlace de alta calidad con un nivel de SINR base de 20 dB. Por otro lado, se realizan las mismas pruebas para un enlace de 10 dB de SINR, poniendo a la conexión en una situación más vulnerable ante la variabilidad del enlace móvil.



Figura 5: Situaciones estáticas.

6.2.2. Pruebas dinámicas

Una vez recogido el comportamiento de los CCAs debido a la latencia y a la variabilidad del enlace inalámbrico, es momento de añadir el movimiento del UE a la ecuación. Gracias a las situaciones previas podemos esperar que el resultado de estas nuevas se encuentren entre los valores obtenidos para enlaces de 20 dB y enlaces de 10 dB. Para ello se dispone de patrones de movimiento simples para ver el impacto que éstos tienen sobre los flujos TCP. Se tratan de visualizar el impacto que la velocidad y la trayectoria tienen sobre la comunicación. Para la simulación se dispone de tres velocidades de desplazamiento, cada una de ellas se estudia en dos situaciones distintas, cuando el UE se aleja al eNB o se acerca al mismo.

1. Escenario a 60 km/h mediante la aplicación de el fading EVA60, velocidad común en entornos rurales.
2. Escenario a 120 km/h mediante la aplicación del fading EVA120, velocidad máxima en carretera en Europa.
3. Escenario a 300 km/h mediante la aplicación del modelo de fading HST para escenarios de desplazamiento de trenes de alta velocidad.



Figura 6: Situaciones de movimiento

7. Descripción de fases y tareas

A continuación se describe la planificación llevada a cabo a lo largo del proyecto. Este trabajo ha sido dividido en diferentes fases que, a su vez, han sido divididas en tareas. En este trabajo han tomado parte tres personas, un jefe de proyecto, un investigador senior y un técnico de investigación.

7.1. Fases del proyecto

Con el objetivo de realizar un trabajo estructurado, se ha dividido el desarrollo del proyecto en diferentes fases:

- 1 Investigación** Se lleva a cabo un estudio sobre las redes LTE y las problemáticas inherentes a las redes móviles. Se presta especial atención a aquellos proyectos que analicen la interacción conjunta de TCP en estos entornos y a los proyectos acerca de BBR publicados hasta el momento.
- 2 Definición del plan de pruebas** Se definen los escenarios en los cuales se llevará a cabo el proyecto. Para ello se determinan los patrones de movimiento del usuario, los fadings a aplicar para añadir variabilidad a cada prueba y las condiciones de la red y del enlace.
- 3 Realización de pruebas** Ejecución de las pruebas previamente definidas comenzando por las de menor complejidad, reconociendo los conocimientos teóricos adquiridos en fases anteriores y analizando los resultados.
- 4 Redacción de la memoria** Documentación completa del trabajo realizado.

7.2. Definición de tareas

7.2.1. Investigación

Unidad de trabajo	Análisis de publicaciones previas
Duración	48h
Encargado	Investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Recopilación de la información disponible sobre investigaciones de TCP redes móviles y de BBR en particular
Entradas	-
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Estado del arte

Tabla 1: Tarea 1. Análisis de publicaciones previas

Unidad de trabajo	Análisis de objetivos
Duración	12h
Encargado	Jefe del proyecto, investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Definir los objetivos que se deben cumplir en el proyecto
Entradas	Análisis de proyectos
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Objetivos y alcance

Tabla 2: Tarea 2. Análisis de objetivos

7.2.2. Definición del plan de pruebas

Unidad de trabajo	Análisis de las limitaciones del entorno móvil
Duración	20h
Encargado	Investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Estudio de los aspectos que tradicionalmente hacen mal funcionar a TCP en entornos móviles
Entradas	-
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Limitaciones del entorno móvil

Tabla 3: Tarea 3. Análisis de las limitaciones del entorno móvil

Unidad de trabajo	Definición de entornos de pruebas
Duración	30h
Encargado	Investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Definición de las situaciones en las que se realizarán las pruebas
Entradas	-
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Descripción de la solución propuesta (1)

Tabla 4: Tarea 4. Definición de entornos de pruebas

Unidad de trabajo	Elección de la plataforma de pruebas
Duración	12h
Encargado	Investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Selección de la plataforma de pruebas
Entradas	Entornos de prueba
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Descripción de la solución propuesta(2)

Tabla 5: Tarea 5. Elección de la plataforma de pruebas

7.2.3. Realización de pruebas

Unidad de trabajo	Configuración de la plataforma de pruebas
Duración	28h
Encargado	Técnico de investigación
Descripción	Configuración de los diferentes entornos de pruebas en la maqueta
Entradas	Descripción de la solución propuesta y Limitaciones del entorno móvil
Recursos necesarios	Maqueta de pruebas
Entregables	Programas de pruebas

Tabla 6: Tarea 6. Configuración de la plataforma de pruebas

Unidad de trabajo	Realización de pruebas en entornos estáticos
Duración	40h
Encargado	Técnico de investigación
Descripción	Ejecución y toma de medidas sobre las pruebas en entornos estáticos siguiendo el plan de pruebas
Entradas	Plan de pruebas y Programas de pruebas
Recursos necesarios	Maqueta de pruebas
Entregables	Entregables de pruebas estáticas

Tabla 7: Tarea 7. Realización de pruebas en entornos estáticos

Unidad de trabajo	Realización de pruebas en entornos dinámicos
Duración	32h
Encargado	Técnico de investigación
Descripción	Ejecución y toma de medidas sobre las pruebas en entornos dinámicos siguiendo el plan de pruebas
Entradas	Plan de pruebas y Programas de pruebas
Recursos necesarios	Maqueta de pruebas
Entregables	Entregables de pruebas dinámicas

Tabla 8: Tarea 8. Realización de pruebas en entornos dinámicos

Unidad de trabajo	Comprobación de resultados
Duración	20h
Encargado	Investigador senior y técnico de investigación
Descripción	Se comprueba la correcta realización y obtención de los resultados de las pruebas, repitiéndose las que fueran necesarias
Entradas	Plan de pruebas, Programas de pruebas, Entregables de pruebas estáticas y Entregables de pruebas dinámicas
Recursos necesarios	Maqueta de pruebas
Entregables	Entregables de pruebas repetidas

Tabla 9: Tarea 9. Comprobación de resultados

Unidad de trabajo	Análisis de resultados de las pruebas
Duración	30h
Encargado	Investigador senior
Descripción	Obtención de parámetros representativos de la calidad de las conexiones mediante métodos estadísticos para determinar el rendimiento de BBR
Entradas	Resultado de las pruebas, Entregables de pruebas estáticas y Entregables de pruebas dinámicas
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Análisis de resultados

Tabla 10: Tarea 10. Post-procesado de resultados de las pruebas

7.2.4. Redacción de la memoria

Unidad de trabajo	Documentación del proyecto
Duración	28h
Encargado	Técnico de investigación
Descripción	Recopilación de todos los entregables, presentar a lo largo del proyecto el trabajo realizado al investigador senior y al jefe del proyecto y redacción de los documentos necesarios para los clientes.
Entradas	Estado del arte, Objetivos y alcance, Descripción de la solución propuesta, Limitaciones del entorno móvil, Plan de pruebas, Programas de pruebas, Entregables de pruebas estáticas, Entregables de pruebas dinámicas y Análisis de resultados
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Estado del Arte y Objetivos, Plan de pruebas, Memoria del TFG

Tabla 11: Tarea 11. Documentación del proyecto

Unidad de trabajo	Supervisión del proyecto
Duración	24h
Encargado	Jefe del proyecto e investigador senior
Descripción	Revisión de la documentación del proyecto
Entradas	Estado del Arte y Objetivos, Plan de pruebas, Memoria del TFG
Recursos necesarios	Herramientas ofimáticas
Entregables	Corrección de la memoria

Tabla 12: Tarea 12. Supervisión del proyecto

8. Diagrama de Gantt

Tareas	Duración estimada (horas)
Investigación	60
Análisis de publicaciones previas	48
Análisis de objetivos	12
Definición del plan de pruebas	62
Análisis de las limitaciones del entorno móvil	20
Definición de entornos de pruebas	30
Elección de la plataforma de pruebas	12
Realización de pruebas	150
Configuración de la plataforma de pruebas	28
Realización de pruebas en entornos estáticos	40
Realización de pruebas en entornos dinámicos	32
Comprobación de resultados	20
Análisis de resultados	30
Redacción del documento	44
Documentación del proyecto	28
Supervisión del proyecto	24
Total	324

Tabla 13: Distribución total de horas

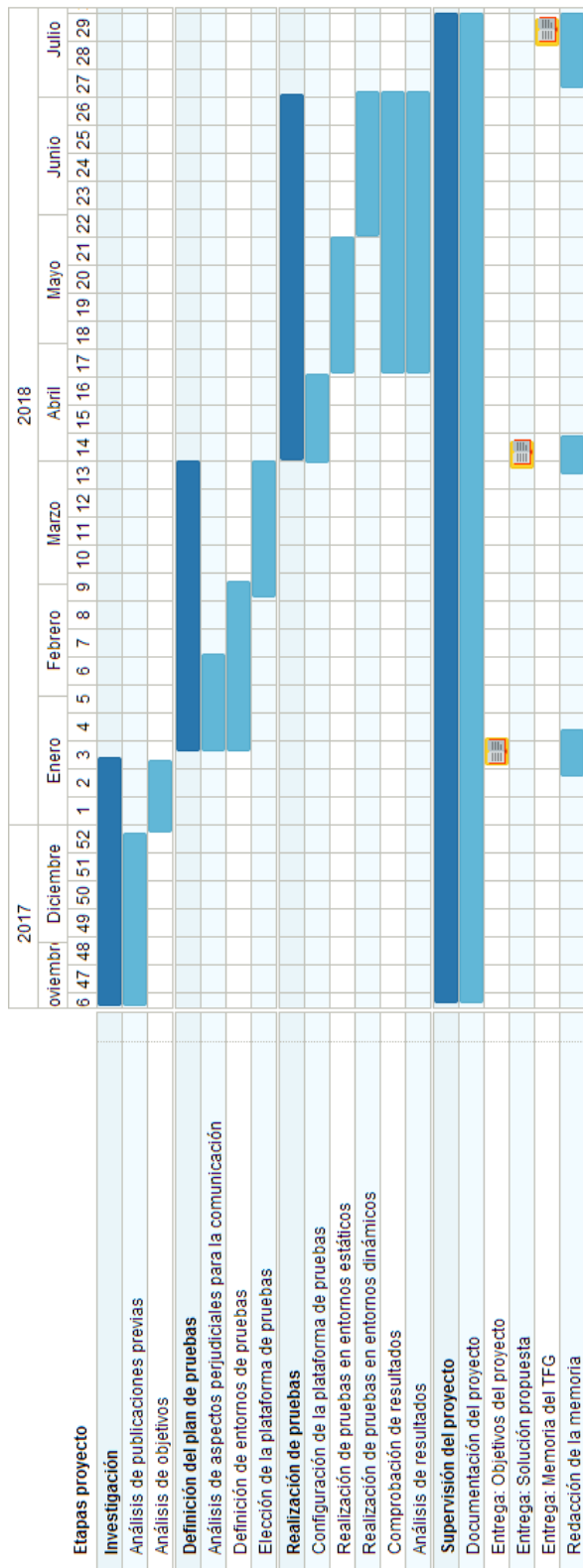


Figura 7: Diagrama de Gantt

9. Algoritmos

Para la realización de las pruebas se ha desarrollado un mecanismo de medida que se ejecuta en el controlador de la maqueta. Este programa establece una conexión TCP entre el dispositivo móvil y el servidor Linux para realizar una descarga que permita caracterizar los aspectos de la comunicación. La conexión es analizada tras finalizar la prueba. Antes de comenzarla, es necesario conectar el dispositivo móvil a la celda LTE creada por Aeroflex y configurar las condiciones de la red en el simulador de colas. Una vez realizados estos pasos se da comienzo a la prueba:

- Primeramente el programa permite seleccionar tanto el CCA a utilizar como el perfil de fading a aplicar. Este programa es de carácter general por lo que dependiendo del tipo de prueba a realizar se deben escoger estos parámetros.
- Una vez seleccionados, se realiza una conexión desde el controlador con Aeroflex para establecer el fading seleccionado. Éste determinará la variabilidad del enlace inalámbrico del móvil. Además, a Aeroflex se le debe especificar la relación señal a ruido base que tendrá el enlace inalámbrico en cada momento. En el caso de las pruebas en las que se utiliza un patrón de movimiento, el SINR aumentará o disminuirá a un ritmo constante para simular el desplazamiento del UE. A este valor es al que se le aplicará el perfil de fading previamente seleccionado.
- Por otro lado, el controlador inicia la ejecución en el servidor Linux de los procesos necesarios para realizar la captura a nivel de socket de la conexión entrante.
- Finalmente se inicia la conexión entre el dispositivo móvil y el servidor Linux con una duración aproximada de 20 segundos. Esta duración es lo suficientemente larga como para visualizar cómo tras el inicio de la conexión el CCA se estabiliza y cómo se adapta a las variaciones del estado del enlace inalámbrico. Para minimizar errores solamente se permiten realizar 6 pruebas con el mismo CCA en cada sesión.

En la siguiente imagen se puede observar el proceso descrito:

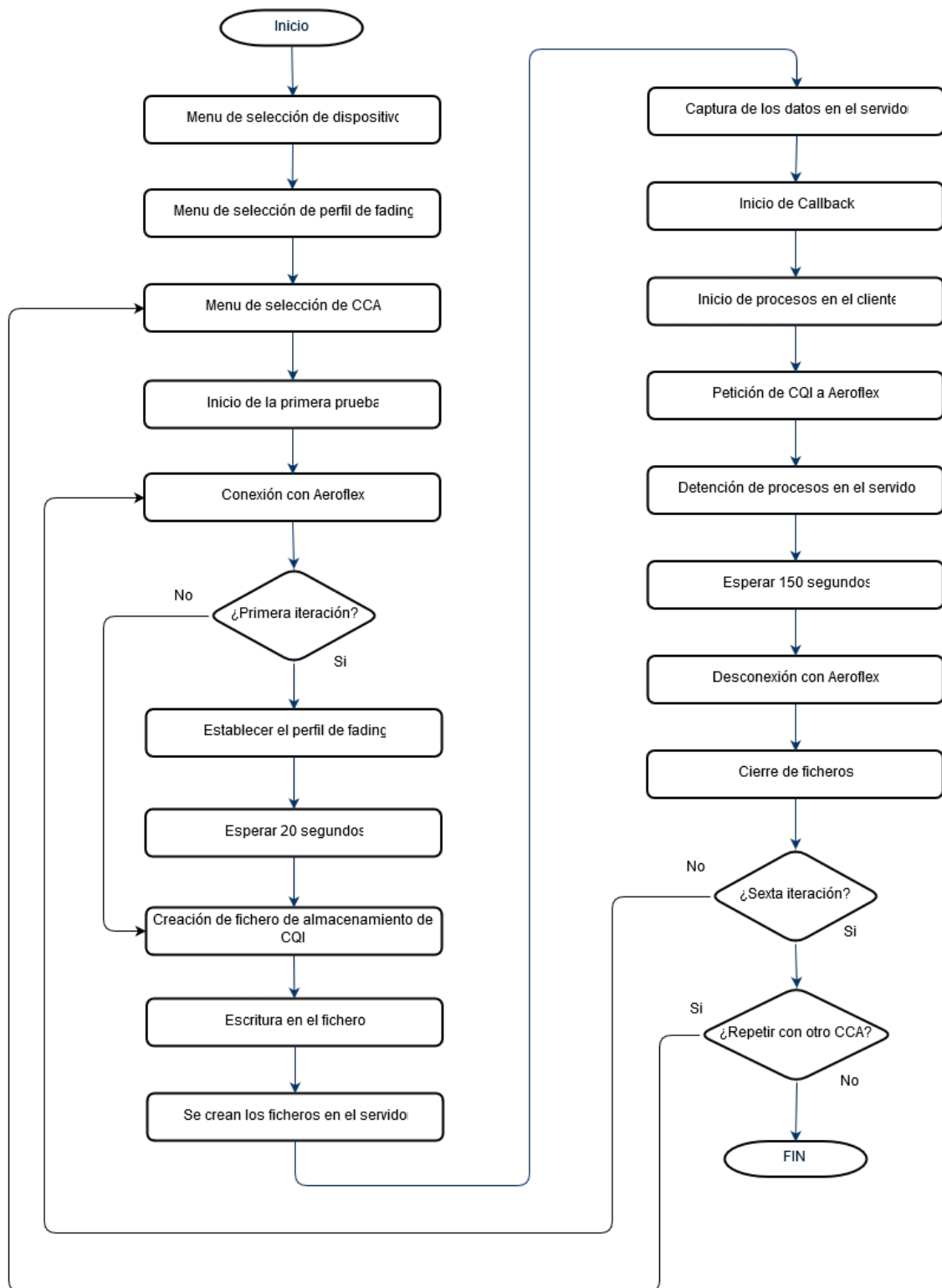


Figura 8: Flujo de la prueba

10. Análisis de Resultados

Para visualizar el comportamiento general de cada CCA en las situaciones de entorno mencionadas se ha realizado un procesamiento estadístico del resultado de las pruebas para sacar un patrón de comportamiento. Siguiendo el plan de pruebas, se comienza observando los resultados obtenidos en las situaciones estáticas y se finaliza con los resultados de las situaciones dinámicas, de modo que se pueda apreciar el impacto de los factores en la comunicación.

10.1. Pruebas estáticas

En las imágenes 9, 10 y 11 se puede apreciar los valores medios de goodput obtenidos ante la latencia y la influencia de diferentes fading junto con el RTT medio durante la comunicación. Tanto BBR como CUBIC y New Reno, en las mejores condiciones son capaces de alcanzar las mismas velocidades, cerca de los 45 Mbps. Sin embargo, a medida que se añaden factores negativos a la comunicación las diferencias se vuelven más notables apareciendo diferencias de rendimiento. Respecto al impacto del fading tenemos tres casos diferenciados:

EVA 60 Es el fading que menos ataca al SINR del canal. Por sí solo su impacto no representa una amenaza para alcanzar un goodput semejante al medido en situaciones ideales y todos los CCA muestran resultados parecidos.

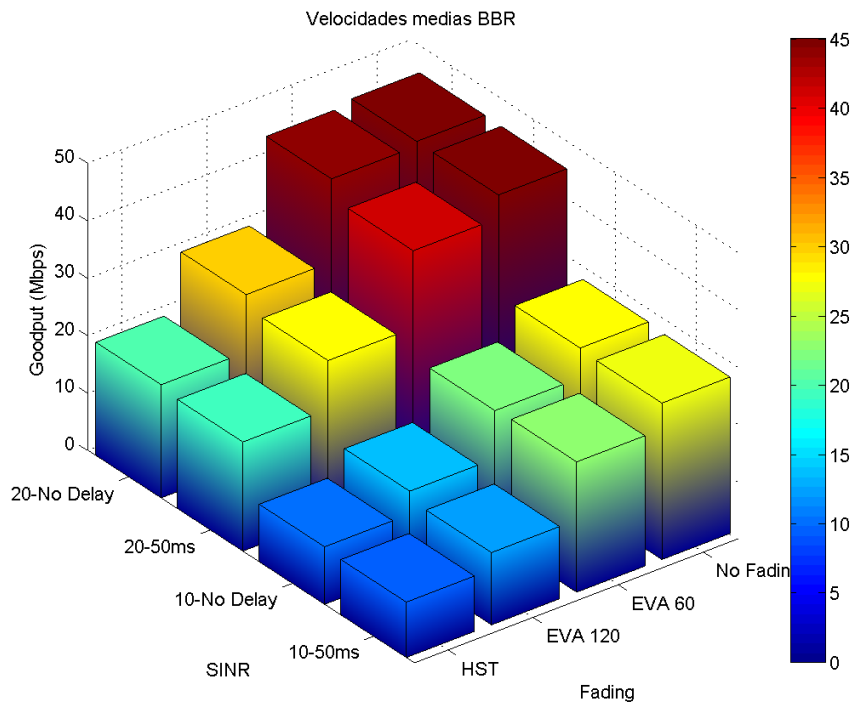
EVA 120 Este fading tiene un impacto moderado en la calidad del enlace inalámbrico y todos los CCAs alcanzan aproximadamente un 66 % de la capacidad máxima bajo su influencia. Este fading reduce el ancho de banda disponible en gran medida pero no cuenta con gran variabilidad. Por ello los resultados obtenidos en los tres protocolos ante su influencia son parejos, tanto en situaciones de 10 dB como en las de 20 dB.

HST Este fading es el más agresivo de los estudiados y reduce la velocidad obtenida frente a las situaciones estáticas en más de un 50%. Tanto en situaciones de 20 dB de SINR como de 10 dB el impacto que tiene en la comunicación es notable. Los resultados muestran que BBR se adapta mejor ante esta situación que CUBIC y New Reno y ofrece además velocidades ligeramente superiores.

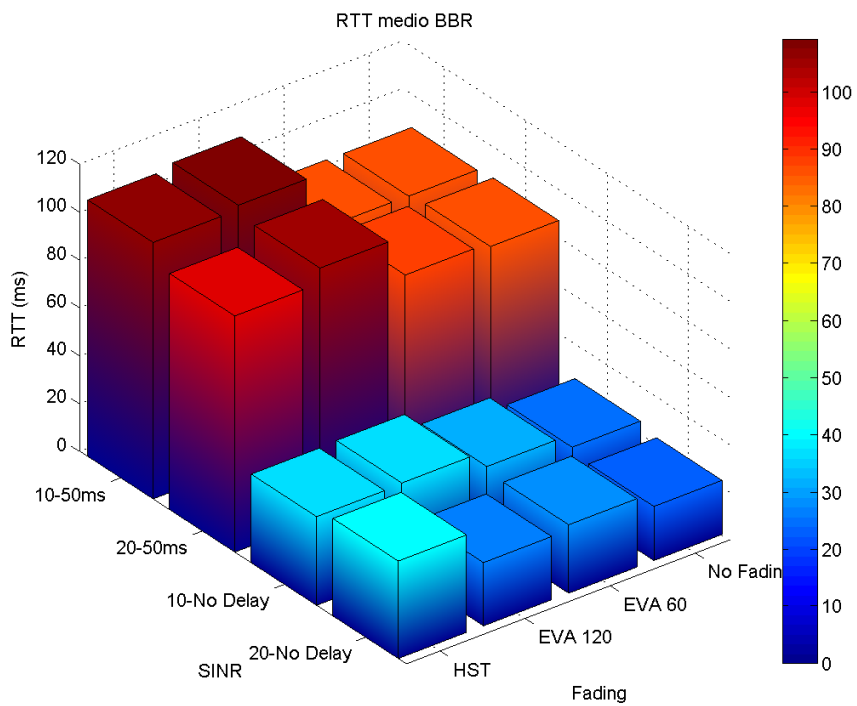
El impacto de la latencia por sí solo vemos cómo no tiene gran repercusión en las velocidades alcanzadas, sin embargo, el efecto de la latencia junto con el del fading perjudican en mayor medida a la conexión que frente a la influencia de solamente uno de ellos. En estas situaciones mixtas en las que la comunicación se ve afectada tanto por el fading como por la latencia es donde se aprecian mayores diferencias entre CCA. BBR

destaca frente a CUBIC y New Reno siendo capaz de ofrecer velocidades parecidas bajo la influencia exclusiva del fading.

En las mediciones del RTT se aprecian distintos comportamientos. CUBIC y New Reno, debido al punto de funcionamiento de los CCA basados en pérdidas, muestran RTT altos propios del efecto *bufferbloat* que ellos mismos crean. BBR logra, a diferencia de ellos, RTT más bajos al funcionar evitando la creación de colas. Sin embargo, se observa que, ante la influencia conjunta de la latencia y de los fading EVA120 y HST, BBR induce la misma carga en la red que CUBIC. Por tanto, BBR ante estas dificultades no trabaja en el punto de funcionamiento óptimo.

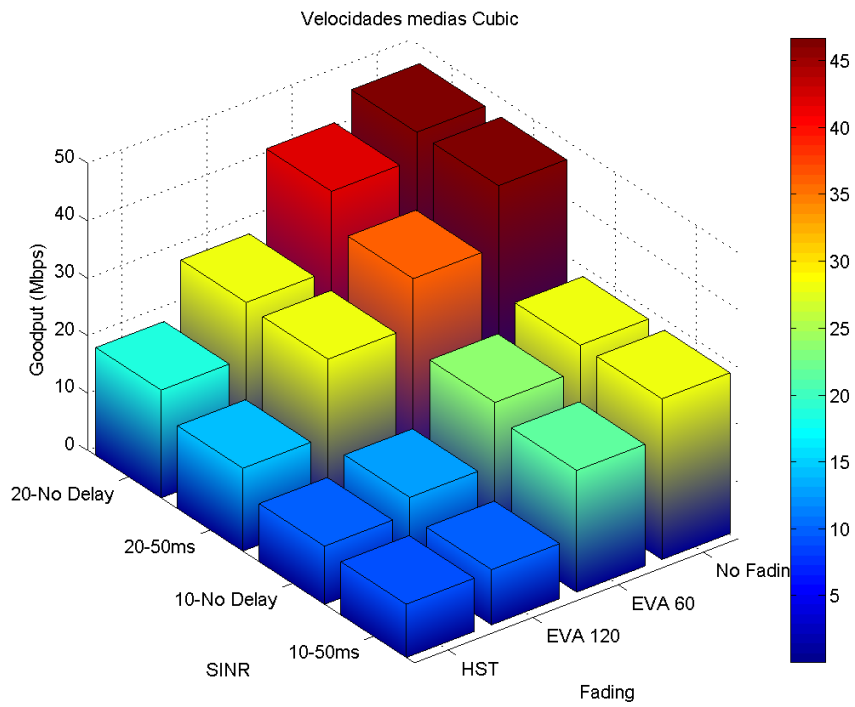


(a) Velocidades medias alcanzadas

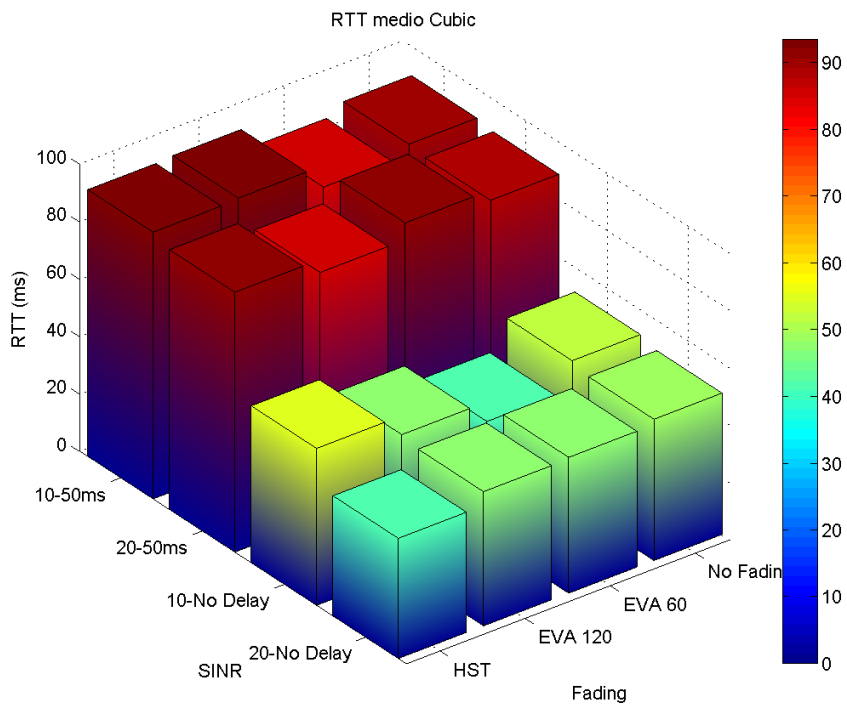


(b) RTT medio de la transmisión

Figura 9: Resultados de las pruebas estáticas con BBR

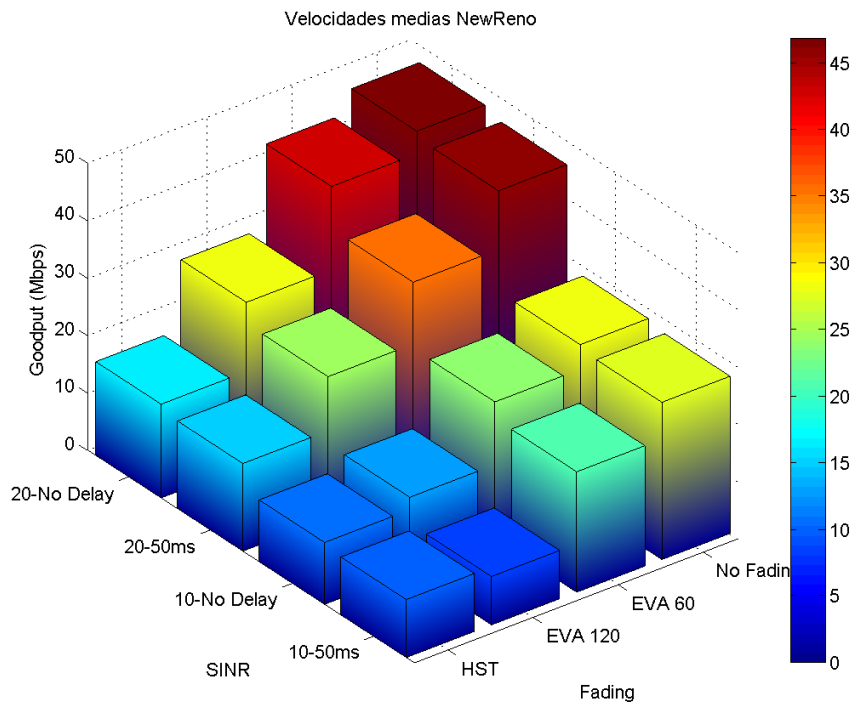


(a) Velocidades medias alcanzadas

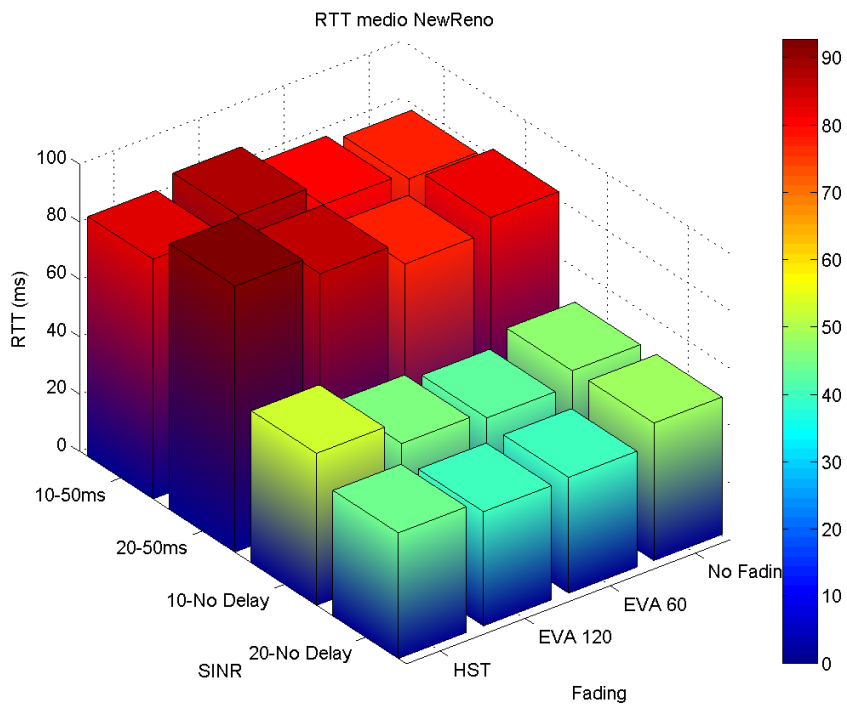


(b) RTT medio de la transmisión

Figura 10: Resultados de las pruebas estáticas con CUBIC



(a) Velocidades medias alcanzadas



(b) RTT medio de la transmisión

Figura 11: Resultados de las pruebas estáticas con CUBIC

Las imágenes 12, 13 y 14 muestran la evolución de las comunicaciones de cada uno de los CCAs al enfrentarse a distintos tipos de fading y con una latencia añadida de 50ms. Se observa la estimación del goodput alcanzado junto con su intervalo de confianza (eje Y) a lo largo de los 20 segundos de la conexión. El goodput es definido como la información útil entregada al destino y el intervalo de confianza muestra los valores de goodput entre los que se obtienen los resultados de las pruebas realizadas. Gracias a estas gráficas se puede apreciar que BBR transmite a una velocidad constante dado que estima la adecuada para para la capacidad de la red y no sufre grandes variaciones en ella a diferencia de CUBIC y New Reno. No sufre tantas interrupciones abruptas y en los casos que las experimenta, se recupera mucho antes que sus competidores.

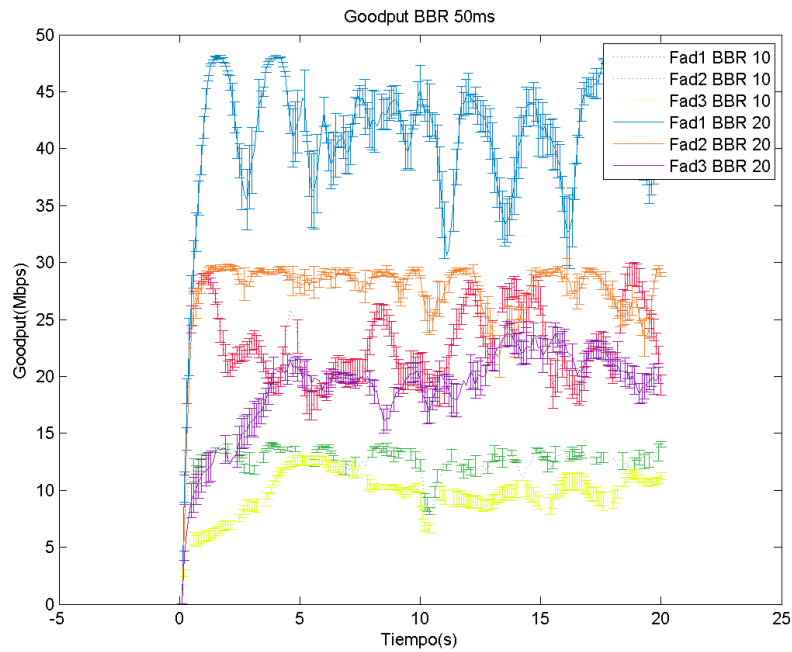


Figura 12: Evolución de las comunicaciones de BBR ante distintos fading

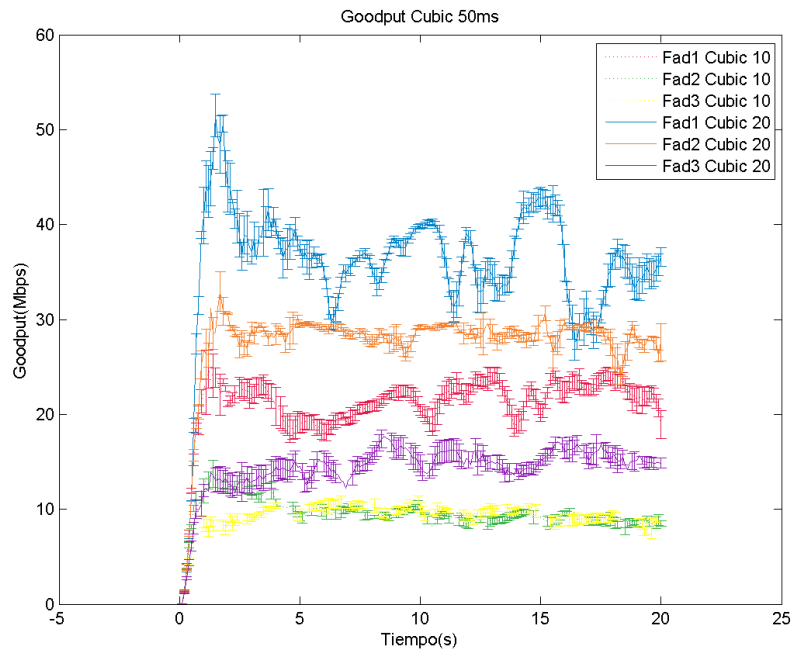


Figura 13: Evolución de las comunicaciones de Cubic ante distintos fading

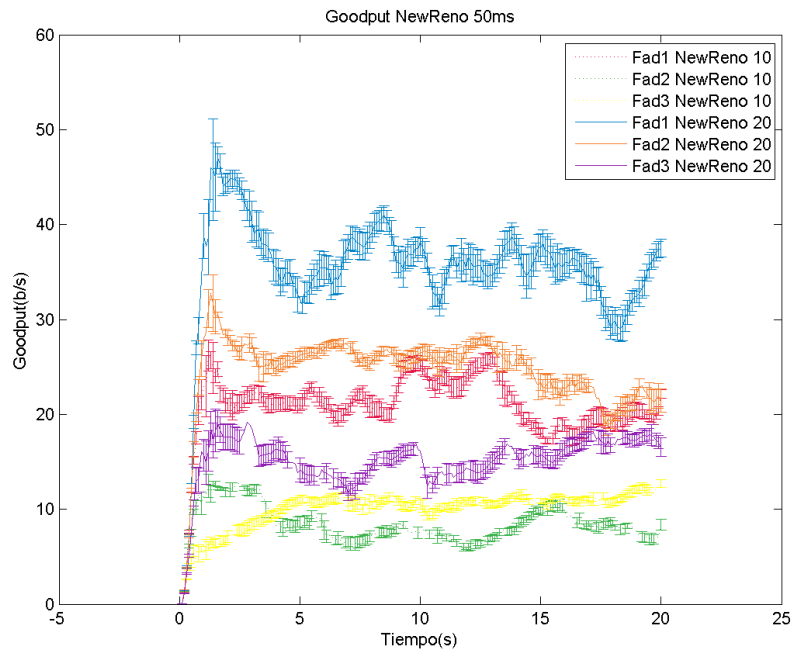


Figura 14: Evolución de las comunicaciones de New Reno ante distintos fading

10.2. Pruebas dinámicas

En las imágenes 14, 15 y 16 se observa la evolución del goodput en situaciones de movilidad. Como ya se ha mencionado se estudian por separado los casos en los que la UE se aleja o se acerca al eNB. Al igual que en las pruebas estáticas se consideran factores como la latencia y el fading.

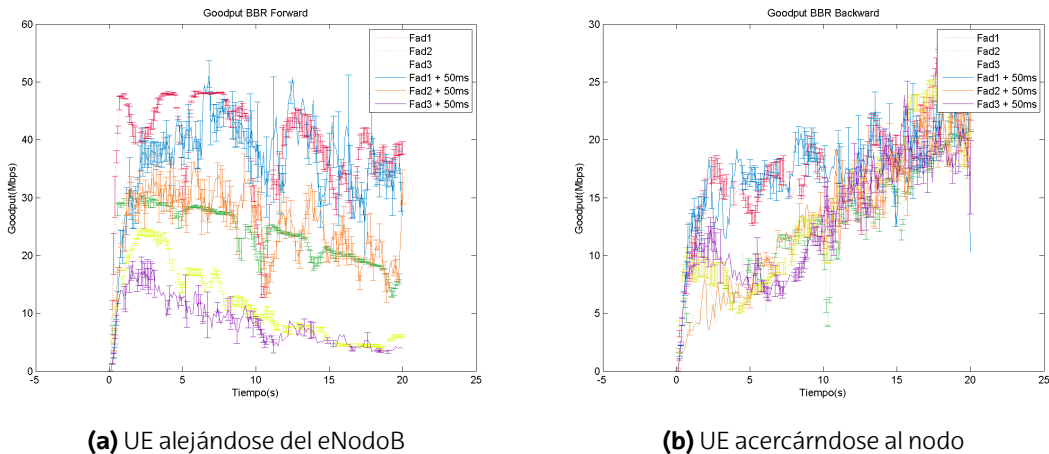


Figura 15: Evolución de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad

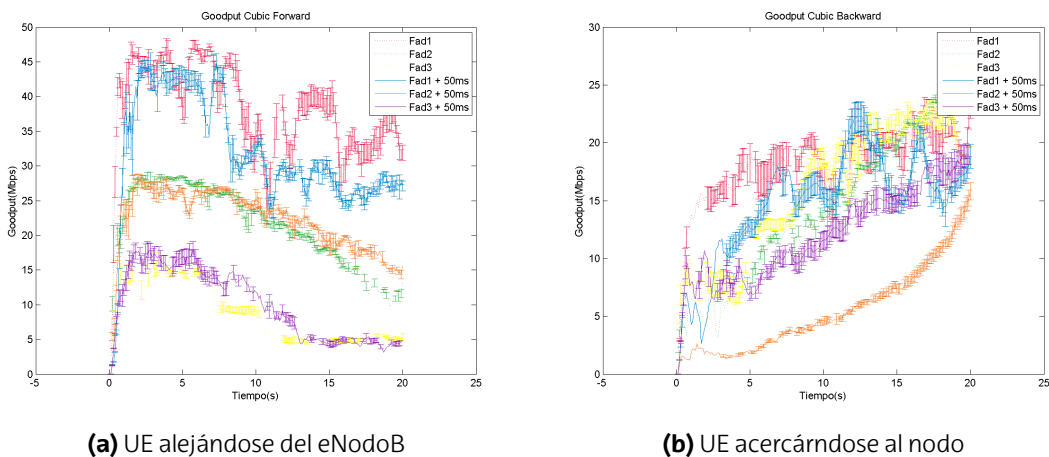


Figura 16: Evolución de las conexiones TCP con CUBIC en situaciones de movilidad

Por un lado, en las situaciones en las que el UE se aleja del eNB, tanto Cubic como New Reno no aprecian el deterioro de las condiciones. Debido a esto, ambos continúan transmitiendo sin variar su patrón de comportamiento para adaptarse a las situación, que resulta en situaciones de congestión y pérdidas graves. Como consecuencia reducen su ventana a la mitad y tratan de recuperarse hasta conseguir el máximo número de paquetes en vuelo o sufrir de nuevo una situación semejante. Es cierto que Cubic se recupera antes que New Reno, sin embargo, BBR consigue adecuarse mejor a todas las situaciones. Logra seguir la evolución del canal de un modo más o menos estable y sobretodo, sin experimentar situaciones de timeout y congestiones severas.

Por otro lado, en las situaciones en las que el UE se acerca al eNB se puede comprobar cómo de rápido los CCA son capaces de ir aumentando su ventana de transmisión. En el caso de New Reno y Cubic, sucede algo semejante al caso anterior. Ambos algoritmos

tratan de aumentar la ventana de transmisión sin tener en cuenta ningún tipo de variabilidad del canal hasta producirse una situación de congestión mas o menos severa. BBR tras caracterizar el enlace en la fase inicial de la conexión, conoce perfectamente las limitaciones del enlace iniciales por lo que transmite acorde a ellas, a medida que UE se acerca al eNB, la conexión mejora y se adapta rápidamente aumentando su transmisión.

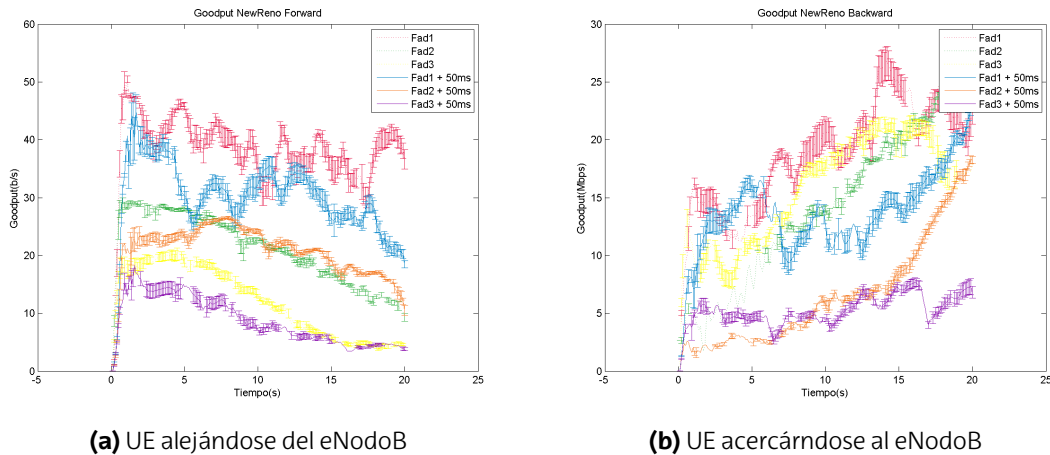
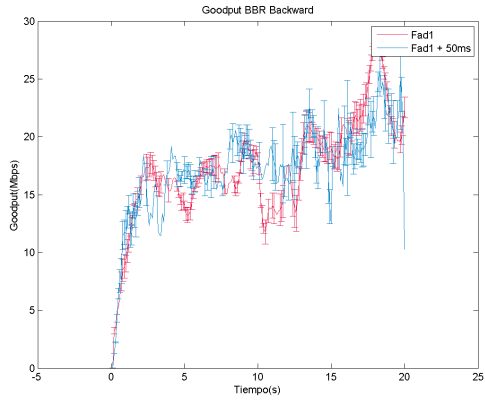


Figura 17: Evolución de las conexiones TCP con New Reno en situaciones de movilidad

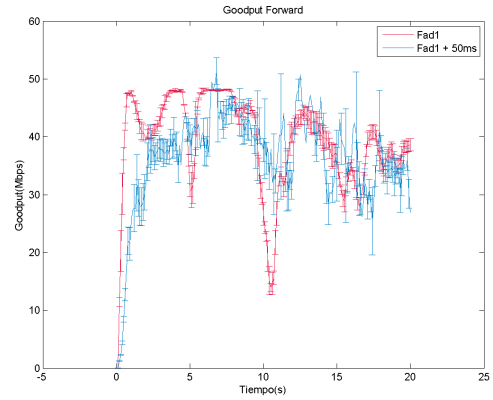
Se puede observar que BBR, a diferencia de los otros CCAS que trabajan sin tener en cuenta la movilidad y otras características como la capacidad del enlace, se adapta mejor al entorno móvil. En la figura 18 se comparan los flujos de las pruebas sin latencia añadida con las pruebas que si la tienen. En ellas se aprecia el comportamiento de BBR en cada uno de las pruebas. Muestran el impacto de la velocidad de desplazamiento en la comunicación que limita la velocidad de transferencia de datos y el impacto de la latencia que, a pesar de que BBR consiga un rendimiento similar con o sin ella, amplía en gran medida el intervalo de confianza.

10.3. Conclusiones del análisis

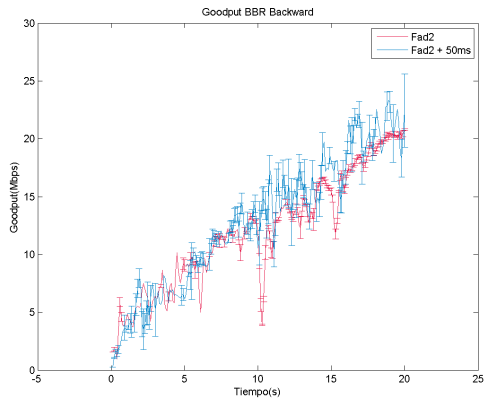
Este análisis inicial encuentra diferencias entre los CCAs basados en pérdidas frente a BBR. A falta de más investigación todo apunta que BBR, en situaciones de movilidad, presenta mejor rendimiento que sus predecesores. Esto se debe a que BBR es capaz de seguir el estado de la conexión y adaptarse más rápidamente sin sufrir situaciones de congestión severa. Quedan pendientes de investigación medir el *fairness* de BBR ante la influencia de otros flujos TCP y ampliar el estudio con patrones de movilidad más complejos y en situaciones reales.



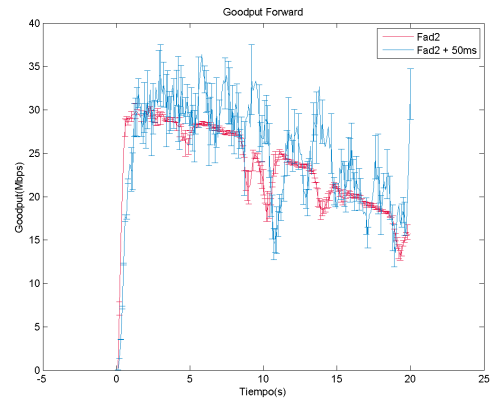
(a) UE alejándose del eNodeB



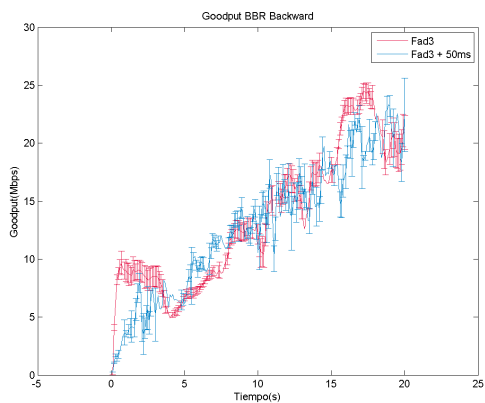
(b) UE acercándose al eNodeB



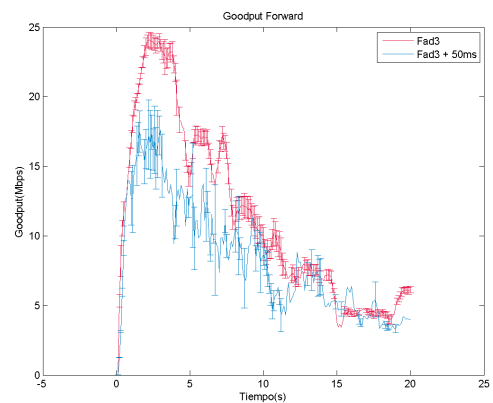
(c) UE alejándose del eNodeB



(d) UE acercándose al eNodeB

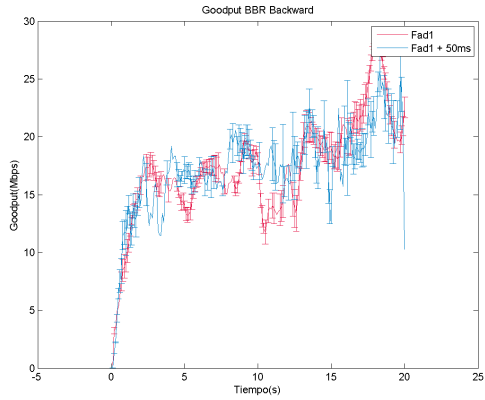


(e) UE alejándose del eNodeB

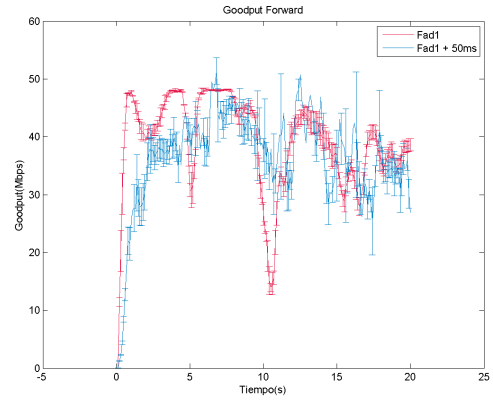


(f) UE acercándose al eNodeB

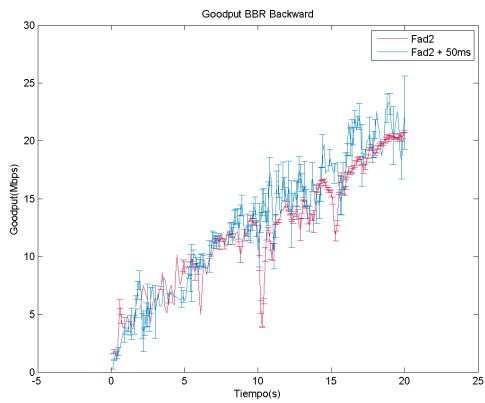
Figura 18: Evolución del goodput de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad



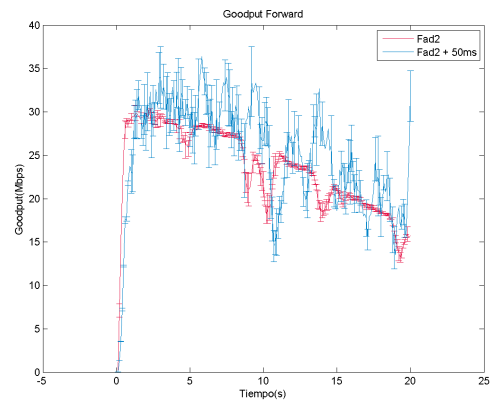
(a) UE alejándose del eNodeB



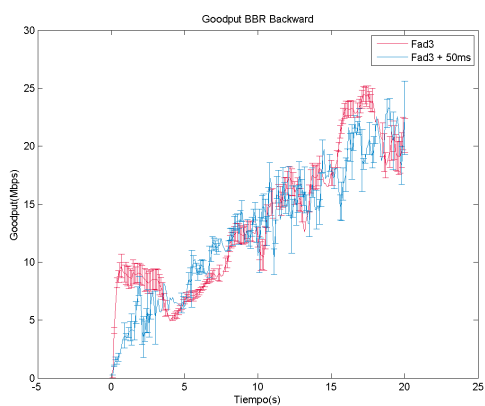
(b) UE acercándose al eNodeB



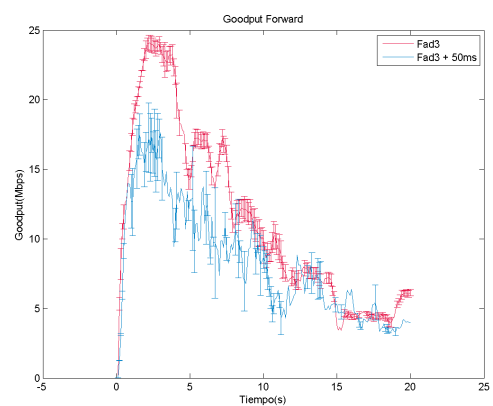
(c) UE alejándose del eNodeB



(d) UE acercándose al eNodeB



(e) UE alejándose del eNodeB



(f) UE acercándose al eNodeB

Figura 19: Evolución del goodput de las conexiones TCP con BBR en situaciones de movilidad

11. Resumen de costes

Se presenta a continuación el resumen de los costes necesarios para la realización del proyecto. Se divide en una partida de horas internas, una de amortizaciones y un resumen general.

Horas Interas			
Concepto	Coste Unitario (€/h)	Número de unidades (h)	Coste
Jefe de proyecto	50	12	600,00€
Investigador senior	35	128	4.480,00€
Técnico de investigación	20	184	3.680,00€
Total			8.760,00€

Tabla 14: Presupuesto. Horas internas

Amortizaciones				
Concepto	Coste Adquisición (€)	Vida Útil (años)	Utilización	Coste (€)
Samsung Galaxy SIII	600	4 (2.000 h/año)	120	9,00
Servidor	1.000	5 (2.000 h/año)	120	12,00
Aeroflex 7100	107.000	10 (1.000 h/año)	120	1.284,00
Simulador de colas	1.000	5 (2.000 h/año)	120	12,00
Controlador	1.000	5 (2.000 h/año)	120	12,00
Router	200	4 (2.000 h/año)	120	3,00
Total				1.332,00€

Tabla 15: Presupuesto. Amortizaciones

Resumen	
Horas Internas	8.760,00€
Amortizaciones	1.332,00€
Subtotal	10.092,00€
Imprevistos (10 %)	1.009,20€
Total	11.101,20€

Tabla 16: Presupuesto. Resumen

12. Conclusiones

La principal conclusión del trabajo desarrollado es que se ha conseguido alcanzar los objetivos planteados para el mismo, cumpliendo con los plazos previstos y con el coste presupuestado inicialmente. Mediante este trabajo se han obtenido una serie de pruebas que han permitido identificar el comportamiento de BBR en situaciones de movilidad en redes LTE que tratan de llenar la falta de conocimiento actual. Se ha elaborado para ello un estudio preliminar de los proyectos que han investigado el rendimiento de TCP en situaciones de movilidad.

El resultado de las pruebas realizadas en este estudio ha sido almacenado con intención de poder ampliar éste análisis en posteriores investigaciones que permitan identificar aspectos a mejorar en el actual funcionamiento de BBR. Para el trabajo se ha utilizado una maqueta de pruebas que cuenta con gran flexibilidad, capaz de ser adaptada para en un futuro ampliar la investigación en otros entornos. A modo analizar el comportamiento de BBR en condiciones de movilidad se ha llevado a cabo un análisis de los resultados de las pruebas. Se ha observado el impacto que tienen las diferentes limitaciones de las redes móviles en un flujo TCP.

El proyecto ha sido enfocado en conocer el rendimiento de BBR en las redes LTE, sin embargo, puede ser utilizado como referencia para comprender el funcionamiento de BBR en las redes 5G. Este tipo de entornos presenta capacidades similares o mayores a las actuales donde hemos visto que BBR consigue mejores resultados que sus predecesores. Además, las situaciones de bajas latencias que se disponen en las redes 5G son beneficiosas para su funcionamiento. En el futuro se requerirá estudiar el comportamiento de BBR en ellas.

Bibliografía

- [1] Ramón Muñoz. *El número de líneas móviles supera por primera vez a la población mundial*. El país, 2018. https://elpais.com/tecnologia/2018/02/27/actualidad/1519725291_071783.html
- [2] Global System for Mobile Communications. *Mobile Economy 2018*. GSMA, 2018. <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2018/05/The-Mobile-Economy-2018.pdf>
- [3] Neal Cardwell, Yuchung Cheng, C. Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, Van Jacobson. *BBR Congestion-Based Congestion Control*. Google, 2016.
- [4] Eneko Atxutegi, Fidel Liberal. *Moving toward the intra-protocol de-ossification of TCP in mobile networks: Start-up and mobility*. Universidad del País Vasco, 2018.
- [5] A. Afanasyev, N. Tilley, P. Reiher and L. Kleinrock *Host-to-Host Congestion Control for TCP* IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 12, no. 3, pp. 304–342, 2010.
- [6] S. Alfredsson, A. Brunstrom and M. Sternad *Cross-layer analysis of TCP performance in a 4G system* Software, Telecommunications and Computer Networks, 2007. SoftCOM 2007. 15th International Conference on. IEEE, 2007, pp. 1–6
- [7] Jim Gettys, Kathleen Nichols *Bufferbloat: dark buffers in the Internet*. Bell Labs, Alcatel-Lucent and Pollere Inc, 2011. <https://queue.acm.org/detail.cfm?id=2071893>
- [8] Y. Xu, Z. Wang, W. K. Leong and B. Leong *An End-to-End Measurement Study of Modern Cellular Data Networks*. Passive and Active Measurement, ser. Lecture Notes in Computer Science, M. Faloutsos and A. Kuzmanovic, Eds. Springer International Publishing, Mar. 2014, no. 8362, pp. 34–45, http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-04918-2_4
- [9] Eneko Atxutegi, Fidel Liberal, Karl-Johan Grinnemoy, Anna Brunströmy, Åke Arvidsson, Remi Robert. *TCP behaviour in LTE: impact of flow start-up and mobility*. Universidad del País Vasco, Karlstad University y Kristianstad University, 2016.
- [10] R. Merz, D. Wenger, D. Scanferla and S. Mauron *Performance of LTE in a High-velocity Environment: A Measurement Study*. Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, and Challenges, ser. AllThingsCellular'14. New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 47–52. <http://doi.acm.org/10.1145/2627585.2627589>
- [11] L. Li, K. Xu, D. Wang, C. Peng, Q. Xiao and R. Mijumbi *A measurement study on TCP behaviors in HSPA+ networks on high-speed rails*. 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Apr. 2015, pp. 2731–273.

- [12] B. Nguyen, A. Banerjee, V. Gopalakrishnan, S. Kasera, S. Lee, A. Shaikh, and J. Van der Merwe *Towards Understanding TCP Performance on LTE/EPC Mobile Networks*. Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, and Challenges, ser. AllThingsCellular '14. New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 41–46. <http://doi.acm.org/10.1145/2627585.2627594>
- [13] J. Huang and other *An In-depth Study of LTE: Effect of Network Protocol and Application Behavior on Performance*. SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 43, no. 4, pp. 363–374, Aug. 2013.
- [14] J. Garcia, S. Alfredsson, and A. Brunstrom *Examining TCP Short Flow Performance in Cellular Networks Through Active and Passive Measurements*. AllThingsCellular '15. New York, NY, USA: ACM, 2015, pp. 7–12.
- [15] J. Huang *A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks*. MobiSys '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 225–238.
- [16] T. Henderson, S. Floyd, A. Gurtov and Y. Nishida *The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm*. RFC 6582 (Proposed Standard), Internet Engineering Task Force, Apr. 2012.
- [17] Sangtae Ha, Injong Rhee. *Hybrid Slow Start for High-Bandwidth and Long-Distance Networks*. Universidad de Nebraska-Lincoln, 2008.
- [18] S. Ha, I. Rhee and L. Xu. *CUBIC: A New TCP-friendly High-speed TCP Variant*. SIGOPS Oper. Syst. Rev., vol. 42, no. 5, pp. 64–74, Jul. 2008 <http://doi.acm.org/10.1145/1400097.1400105>
- [19] Neal Cardwell, Yuchung Cheng, C. Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, Van Jacobson. *BBR Congestion Control draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00*. IETF, 2017. <https://tools.ietf.org/html/draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00>
- [20] D. A. Hayes and G. Armitage *Revisiting TCP Congestion Control Using Delay Gradients*. NETWORKING 2011, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, J. Domingo-Pascual, P. Manzoni, S. Palazzo, A. Pont, and C. Scoglio, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, vol. 6641, pp. 328–341. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20798-3_25
- [21] Mario Hock, Roland Bless, Martina Zitterbart *Experimental Evaluation of BBR Congestion Control*. Karlsruhe Institute of Technology, 2017 <http://doc.tu.berlin.de/2017-kit-icnp-bbr-authors-copy.pdf>
- [22] Neal Cardwell, Yuchung Cheng, C. Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, Van Jacobson. *BBR Congestion Control draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00*. IETF, 2017. <https://tools.ietf.org/html/draft-cardwell-iccr-g-bbr-congestion-control-00>

Anexo I: Plan de pruebas

Tal y como se ha venido anunciando a lo largo del documento, las pruebas han seguido una estructura ordenada con complejidad incremental. A continuación se presentan dos ejemplos de los entregables rellenos al finalizar cada prueba junto el calendario de las pruebas seguido.

Identificador	P2F0M0L1BBR
Fecha	10/11/2017
Encargado	Técnico de Investigación
Descripción	Prueba en entornos dinámicos sin fading sin latencia
Condiciones	Estático Fading No /1/2/3 Latencia Si/ No SINR 10/ 20 dB Movimiento Backward/Foward
CCA	BBR /CUBIC/New Reno
Número de prueba	2
Nombre del fichero	0-Static-20-Mobile-BBR-20s-2
Lugar de almacenamiento	/pruebas_estáticas/NoDelay/0-Static-20-Mobile-BBR-20s-2
Resultado	Satisfactorio
Repetir	Si/ No
Comentarios	Ninguno

Tabla 17: Ejemplo 1: Formulario entregado tras la realización de una prueba estática

Identificador	P1F1M1L1BBR
Fecha	10/11/2017
Encargado	Técnico de Investigación
Descripción	Prueba en entornos dinámicos con fading EVA 60 sin latencia
Condiciones	Estático Fading No/ 1 /2/3 Latencia Si/ No SINR 10/20 dB Movimiento Backward /Foward
CCA	BBR /CUBIC/New Reno
Número de prueba	1
Nombre del fichero	60-Backward-Mobile-BBR-20s-1
Lugar de almacenamiento	/pruebas_dinámicas/NoDelay/60-Backward-Mobile-BBR-20s-1
Resultado	Satisfactorio
Repetir	Si/ No
Comentarios	Ninguno

Tabla 18: Ejemplo 2: Formulario entregado tras la realización de una prueba en movimiento

Identificador	P5F3M2L1CUBIC
Fecha	10/11/2017
Encargado	Técnico de Investigación
Descripción	Prueba en entornos dinámicos con fading HST sin latencia
Condiciones	Estático Fading No/1/2/ 3 Latencia Si/ No SINR 10/20 dB Movimiento Backward/ Foward
CCA	BBR/ CUBIC /New Reno
Número de prueba	5
Nombre del fichero	300-Forward-Mobile-CUBIC-20s-5
Lugar de almacenamiento	/pruebas_dinámicas/NoDelay/300-Forward-Mobile-CUBIC-20s-5
Resultado	Satisfactorio
Repetir	Si/ No
Comentarios	Ninguno

Tabla 19: Ejemplo 3: Formulario entregado tras la realización de una prueba en movimiento

SINR 20dB	CCA	Fading				Latencia	
		No	EVA 60	EVA 120	HST	No	Si
Semana 17	BBR	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
Semana 18	CUBIC	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
Semana 18	New Reno	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
				X	X		

Tabla 20: Calendario de pruebas estáticas con 20 dB de SINR

SINR 10dB	CCA	Fading				Latencia	
		No	EVA 60	EVA 120	HST	No	Si
Semana 19	BBR	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
Semana 20	CUBIC	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
Semana 21	New Reno	X				X	
			X			X	
				X		X	
					X	X	
		X					X
			X				X
				X			X
				X	X		

Tabla 21: Calendario de pruebas estáticas con 10 dB de SINR

Backward	CCA	Fading			Latencia	
		EVA 60	EVA 120	HST	No	Si
Semana 22	BBR	X			X	
			X		X	
				X	X	
		X				X
			X			X
Semana 23	CUBIC	X			X	
			X		X	
				X	X	
		X				X
			X			X
Semana 23	New Reno			X		X
		X			X	
			X		X	
		X				X
			X			X

Tabla 22: Calendario de pruebas dinámicas con movimiento del UE hacia del eNB

Forward	CCA	Fading			Latencia	
		EVA 60	EVA 120	HST	No	Si
Semana 24	BBR	X			X	
			X		X	
				X	X	
		X				X
			X			X
Semana 25	CUBIC	X			X	
			X		X	
				X	X	
		X				X
			X			X
Semana 25	New Reno			X		X
		X			X	
			X		X	
		X				X
			X			X

Tabla 23: Calendario de pruebas dinámicas con movimiento del UE alejándose del eNB