



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Unidad Iztapalapa

Distribución de contenidos en redes MANET utilizando el paradigma P2P

Idónea Comunicación de Resultados que presenta

Ing. Eduardo Andrés Marcelo

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias y Tecnologías de la Información

Asesores: Dra. Elizabeth Pérez Cortés y Dr. Miguel López Guerrero

Sinodales:

Presidente: Dr. Javier Gómez Castellanos

Secretario: Dra. Elizabeth Pérez Cortés

Vocal: Dr. Michael Pascoe Chalke

Vocal: Dr. Adán Geovanni Medrano Chávez

Ciudad de México, enero de 2018



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

**Distribución de contenidos en redes MANET
utilizando el paradigma P2P**

Idónea Comunicación de Resultados que presenta

Ing. Eduardo Andrés Marcelo

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias y Tecnologías de la Información

Asesores: Dra. Elizabeth Pérez Cortés y Dr. Miguel López Guerrero

Sinodales:

Presidente: Dr. Javier Gómez Castellanos

Secretario: Dra. Elizabeth Pérez Cortés

Vocal: Dr. Michael Pascoe Chalke

Vocal: Dr. Adán Giovanni Medrano Chávez

Ciudad de México, enero de 2018

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Autónoma Metropolitana y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto de investigación.

También agradezco sinceramente a mis asesores, Dra. Elizabeth Pérez Cortés y Dr. Miguel López Guerrero, por su ejemplar compromiso, apoyo, paciencia y observaciones profesionales a lo largo del desarrollo de este proyecto de investigación. Gracias también, al Dr. Adán Geovanni Medrano Chávez por su ayuda incondicional a lo largo de la evolución del proyecto. A los doctores Javier Gómez Castellanos y Michael Pascoe Chalke les agradezco el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y por sus valiosas recomendaciones para mejorarlo. En conjunto deseo extender mi reconocimiento a los profesores y compañeros del Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información (PCyTI) que contribuyeron en mi formación académica. Finalmente, quiero agradecer a mi familia, pues sin su apoyo nunca habría conseguido terminar el presente proyecto de investigación.

Resumen

Con el advenimiento de los dispositivos electrónicos portátiles, tales como el teléfono inteligente (*smartphone*) o el PDA (*personal digital assistant*), es posible formar una red de comunicación en modo *ad hoc*: una red sin la intervención de un control centralizado. Considerando que los dispositivos móviles que realizan esta conexión son transportados por humanos que se desplazan en una determinada área geográfica, se crea una red MANET (*mobile ad hoc network*). Las aplicaciones que se le pueden dar a una MANET van desde establecer comunicación en zonas de desastre, hasta ofrecer servicios de compartición de contenido digital en condiciones normales.

Este trabajo parte de la intención de intercambiar contenido digital utilizando el paradigma par a par (P2P) en el entorno MANET y se asume que los dispositivos son portados por humanos. Evidentemente, el protocolo a elegir para ofrecer dicho servicio es de vital importancia, particularmente por la transitoriedad de los participantes en la compartición del recurso digital. En primera instancia, una elección factible es BitTorrent, puesto que es uno de los protocolos más representativos del paradigma P2P y ha demostrado un desempeño eficiente en Internet. De hecho, existen múltiples adaptaciones de este protocolo al entorno MANET. Sin embargo, en todos los proyectos analizados, no se ha considerado que los dispositivos son portados por humanos.

Es por ello que, en este trabajo, se presenta la identificación y catalogación de las adaptaciones del protocolo BitTorrent al entorno MANET con respecto a la arquitectura y estrategias propuestas. Además, se presenta una evaluación de rendimiento de las propuestas, misma que se realiza mediante simulación de eventos discretos. Para la representación de la movilidad humana se utiliza el modelo de movilidad SLAW (*self-similar least-action walk*), el cual sintetiza en la simulación, varios descubrimientos realizados en este campo.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación se infiere que las oportunidades de compartición P2P en el entorno MANET, bajo consideraciones de la movilidad humana, son mayores en comparación con las hipótesis de las propuestas analizadas, en donde las evaluaciones que contemplaban movilidad peatonal utilizaron el modelo *random waypoint*. No obstante, con

respecto a la equidad en la distribución del contenido se observa que, en general, las adaptaciones del protocolo no proponen mecanismos para lograr una distribución justa del contenido en el entorno MANET. Asimismo, las mediciones sobre el nivel de sobrecarga en la red inducida por la capa BitTorrent permiten apreciar que el servicio de distribución no invierte recursos de la red de manera excesiva en la solicitud de envíos redundantes del contenido. A partir de esta última observación, es posible intuir que los cambios en la topología de la red MANET no son tan abruptos bajo el modelo SLAW pues las transmisiones son raramente interrumpidas. Las características de la movilidad humana también repercuten directamente en el incremento del porcentaje de descargas completas y disminución del tiempo de distribución.

Índice general

Agradecimientos	i
Resumen	1
Índice general	2
1 Introducción	5
1.1 Objetivos del proyecto	6
1.2 Método de investigación	7
1.3 Aportes	7
1.4 Estructura del documento	8
2 Marco conceptual	9
2.1 Descarga P2P de contenidos	9
2.2 BitTorrent	11
2.3 Redes MANET	18
3 Adaptación de BitTorrent al entorno MANET: perspectiva actual	23
3.1 Adaptación de BitTorrent al entorno MANET	23
3.2 Estrategias identificadas para la elección de pares a desahogar	25
3.3 Estrategias identificadas para la selección de pieza	27
3.4 Arquitectura de las propuestas	29
3.5 Validación de las propuestas	30
3.6 Discusión	32
4 Consideraciones sobre la movilidad humana y metodología experimental	35
4.1 Descubrimientos sobre la movilidad humana	35

4.2	Entorno de simulación	37
4.3	Medidas de desempeño	42
4.4	Configuración de las simulaciones	43
5	Evaluación de desempeño: resultados y análisis	45
5.1	Tiempo promedio de descargas exitosas sobre tiempo de descarga	45
5.2	Equidad en la distribución del contenido	52
5.3	Sobrecarga	54
6	Conclusiones y perspectivas	57
	Referencias	59

En la actualidad, la creciente inclusión en la vida diaria del acceso a Internet y la proliferación de dispositivos electrónicos portátiles han dado lugar a un desarrollo acelerado de las redes inalámbricas móviles. La mayor parte de las conexiones con dispositivos inalámbricos se logra a través de redes inalámbricas basadas en infraestructura. Estas redes incorporan puntos de acceso que se conectan a redes cableadas en algún punto para ofrecer acceso a archivos, bases de datos e Internet [5]. Aun cuando estas redes ofrecen una forma efectiva de obtener servicios de red, la configuración de su infraestructura requiere tiempo y origina costos [24]. Actualmente, las redes inalámbricas son un complemento indispensable a las redes cableadas a fin de satisfacer necesidades de movilidad y cobertura en lugares difíciles de cablear. En consecuencia, la popularidad de las redes inalámbricas ha crecido rápidamente [3].

De manera alterna a las redes de comunicaciones inalámbricas convencionales, la colección de dispositivos electrónicos móviles que forman una red inalámbrica de tipo *ad hoc*¹ no necesita contar con un equipo dedicado a la gestión de funciones. Las entidades en la red pueden, libremente y de forma dinámica, establecer enlaces inalámbricos con sus vecinos y definir una forma o «topología». Si en este tipo de redes las entidades son móviles, se crean las denominadas redes MANET (*mobile ad hoc network*), las cuales pueden proporcionar servicios de red en áreas donde no existe una infraestructura fija [9]. Dentro de las aplicaciones que se han impulsado para aprovechar este tipo de redes se encuentran las comunicaciones en entornos sociales sin infraestructura fija, conexión entre personal de emergencia en zonas de desastre y distribución de contenidos digitales [16, 32], entre otras.

En una red MANET cada dispositivo electrónico exhibe un patrón de movilidad que depende de la entidad que lo transporta. Dicha peculiaridad de la movilidad influye en la manera en la que la topología de la red evoluciona y, por ende, en el desempeño de los servicios de red que se deseen poner en funcionamiento. En lo subsecuente se asume que los aparatos electrónicos son

¹El término *ad hoc* proviene del latín y significa «para un solo propósito particular».

transportados por humanos cuyos desplazamientos se realizan en una determinada área geográfica.

Para poder ofrecer el servicio de distribución de contenidos en el entorno MANET es necesario contar con protocolos de comunicación que busquen acelerar la velocidad de transferencia de datos y al mismo tiempo reducir la sobrecarga en la red debida a los mensajes de señalización. En redes como Internet, los protocolos de distribución de contenidos digitales par a par (P2P) han tenido numerosos casos de éxito [20]. La colaboración e igualdad de funciones que tienen los participantes en un sistema P2P propician una autonomía significativa con respecto a los modelos de distribución que utilizan servidores centrales; esto los vuelve atractivos para ser implementados en MANET.

El protocolo más popular de la distribución de contenidos P2P es BitTorrent, el cual ha demostrado un desempeño eficiente en Internet [12]. Por consiguiente, una alternativa para efectuar la distribución de contenidos es utilizar este protocolo en el ámbito MANET. Sin embargo, los protocolos desarrollados para las redes con infraestructura fija no se pueden aplicar directamente en las redes MANET, las cuales operan sobre condiciones menos favorables [25]. La comunidad científica ha presentado esfuerzos para adaptar BitTorrent al entorno MANET [7, 11, 12, 14, 15, 25] sin que hasta el momento exista una adaptación del protocolo universalmente adoptada. Si bien cada una de las propuestas fue evaluada, esas evaluaciones no son útiles para seleccionar el protocolo más conveniente pues fueron hechas usando diferentes parámetros y sin considerar las características de la movilidad humana. Ante esta situación, en este proyecto de investigación se analizan y evalúan los diferentes esfuerzos encaminados a realizar la distribución de contenidos P2P eficientemente en redes MANET en donde los dispositivos son portados por humanos. Con esta premisa se busca identificar las estrategias exitosas para realizar la distribución de contenido, y con ello motivar la exploración de una variante del protocolo que logre aprovechar todo el potencial que ofrece una red MANET.

1.1 Objetivos del proyecto

1.1.1 Objetivo general

Evaluar las adaptaciones del protocolo de descarga de contenidos P2P BitTorrent al entorno MANET bajo un marco uniforme que considere las características de la movilidad humana.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Identificar variantes existentes del protocolo de descarga BitTorrent para MANET.
2. Identificar las estrategias utilizadas en las variantes de BitTorrent para su funcionamiento sobre MANET.
3. Conocer el rendimiento relativo de las variantes del protocolo BitTorrent sobre el entorno MANET, bajo un modelo de movilidad humana.

1.2 Método de investigación

El método de investigación consiste en los puntos listados a continuación:

1. Análisis de la literatura para compilar y comprender las variantes del protocolo de descarga de BitTorrent propuestas para MANET.
2. Identificación de las estrategias de los protocolos propuestos y análisis del rendimiento reportado.
3. Selección de una herramienta de simulación.
4. Diseñar e implementar un marco de evaluación uniforme.
5. Planteamiento de los escenarios de evaluación de los protocolos.
6. Programación de los protocolos.
7. Diseño y ejecución de experimentos con los protocolos.
8. Análisis de los resultados.
9. Comunicación idónea de los resultados de la evaluación.

1.3 Aportes

Como parte de los aportes al cuerpo de conocimientos del tema de este proyecto de investigación se resaltan los siguientes puntos:

1. Evaluación de rendimiento entre las propuestas planteadas en el estado del conocimiento para la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET. A diferencia de los estudios existentes, la evaluación de las propuestas se realiza bajo los efectos inducidos por las características de la movilidad humana.
2. Clasificación de los esfuerzos realizados en la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET con respecto a la arquitectura y estrategias propuestas. Cabe resaltar que este es el primer esfuerzo del que se tiene conocimiento en donde se identifican, estudian y catalogan las diferentes propuestas existentes.

1.4 Estructura del documento

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se expone el marco conceptual de la descarga de contenidos P2P y redes MANET. En el capítulo 3 se presenta el análisis del estado del conocimiento para la adaptación del protocolo BitTorrent sobre el entorno MANET y se catalogan las estrategias utilizadas en estas adaptaciones. Este capítulo cierra con una discusión sobre las problemáticas y soluciones de las adaptaciones del protocolo analizadas. Posteriormente, en el capítulo 4 se exponen los modelos de simulación utilizados y sus respectivas configuraciones para el diseño de los escenarios de evaluación propuestos. A su vez, los descubrimientos sobre la movilidad humana se presentan en este capítulo. Después, en el capítulo 5 se exponen y analizan los resultados obtenidos durante la fase de experimentación. Finalmente, en el capítulo 6 se reportan las conclusiones sobre los resultados obtenidos en este proyecto de investigación.

CAPÍTULO 2

Marco conceptual

En este capítulo se presenta el paradigma P2P, enfocándonos en una de sus aplicaciones: la distribución de contenido digital. En esta dirección, se describen los mecanismos del protocolo BitTorrent el cual ha tenido gran éxito en Internet para realizar la descarga de contenido digital. BitTorrent también ha sido la base de la mayoría de los esfuerzos para construir una aplicación de distribución de contenidos sobre MANET, dichos esfuerzos serán estudiados en el capítulo siguiente y su comprensión requiere de los conceptos aquí incluidos. Para cerrar el capítulo, se presentan las características más representativas de las redes MANET.

2.1 Descarga P2P de contenidos

Hoy en día, Internet puede ser analizado a modo de comunicaciones orientadas a contenidos [31]. El patrón de comunicación orientado a contenidos se presenta cuando un usuario en la web necesita un contenido digital específico, sin importar la ubicación del recurso en cuestión.

Una de las opciones más simples para realizar la distribución de contenido es utilizar la arquitectura cliente-servidor. Esta solución trae como consecuencia que cuando un cliente desea obtener una copia del contenido almacenado en un servidor, no cuenta con ninguna garantía de un retardo máximo en el tiempo de respuesta del servicio. Si la memoria del sistema en términos prácticos se considera infinita, el tiempo de distribución se incrementa sin límite a medida que el número de clientes que llegan excede la capacidad de atención del sistema [1]. Por otra parte, al contar con un servidor único para la distribución del contenido, ante la falla de este, el servicio de distribución se interrumpe.

Para tratar de reducir los inconvenientes de la arquitectura cliente-servidor, los proveedores de contenidos han optado por utilizar redes superpuestas formadas por un conjunto dedicado de servidores conocidas como CDN (*content distribution network*). Las CDN se basan en el principio de acercar el contenido a los clientes que se ubican muy lejos del servidor (reduciendo los tiempos

de espera por parte de los clientes, para acceder a dicho contenido).

Tanto la arquitectura cliente-servidor como la administración de una CDN son alternativas que se pueden utilizar para realizar la distribución de contenidos. Las desventajas principales de ambas soluciones son el costo asociado a la infraestructura que requieren y la centralización de funciones en uno o varios servidores. Para solventar estos retos, existe otra arquitectura de red llamada par a par (P2P, *peer to peer*) que aprovecha la comunicación directa entre los equipos finales. Puesto que todos los equipos tienen igualdad de funciones a estos se les denomina pares (*peers*). De acuerdo con su naturaleza, los pares se comunican sin pasar por un servidor dedicado, lo cual conlleva a que cada participante se convierta tanto en proveedor como en cliente del contenido.

Las redes P2P han sido utilizadas en los servicios de comunicación basados en Internet, aunque su desarrollo ha sido impulsado principalmente por la distribución de archivos en línea [39]. Normalmente, las aplicaciones P2P son diseñadas como redes superpuestas, construidas en la capa de aplicación de la pila de protocolos. Algunas de las ventajas que poseen las redes P2P en comparación con la arquitectura cliente-servidor son [20]:

- Escalabilidad: Cuando un par solicita un recurso produce una carga de trabajo, pero también incorpora capacidades de servicio al sistema distribuyendo el recurso a otros pares una vez que lo adquiere.
- Independencia de un servidor central: Se asume que todos los pares son iguales y tienen las mismas responsabilidades. No existen pares con funciones particulares.
- Robustez: Un par que experimenta alguna falla o decide suspender su colaboración en la red, puede ser reemplazado por otro par para continuar proporcionando el servicio.
- Autoorganización [13]: La autoorganización es una característica de diversos sistemas físicos y sociales que hace que se mantenga la coordinación entre sus miembros sin que se necesite de un ente particular en la red o entorno que se ocupe exclusivamente de esa tarea. Esto implica que los pares cooperan en la formación y mantenimiento de la red superpuesta, con cada par usando el estado local y la información parcial sobre la red superpuesta.

Los proveedores de servicios en Internet cada vez están más interesados en utilizar el paradigma P2P para sus aplicaciones. Esto es debido a que presenta una buena relación costo-prestaciones, ya que típicamente no requiere una infraestructura de servidores significativa ni un gran ancho de

banda de servidor [20]. Uno de los protocolos más representativos del paradigma P2P es BitTorrent, el cual se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

2.2 BitTorrent

En esta sección se examina la funcionalidad del protocolo BitTorrent en su versión original. Aunque no se ofrece un compendio exhaustivo de las características de este, se procura resaltar los elementos esenciales que se requieren para realizar la distribución de contenido digital.

2.2.1 Conceptos básicos de BitTorrent

BitTorrent es un protocolo creado en 2003 que utiliza el paradigma P2P para compartir contenidos digitales a través de Internet. Muchos sitios web de intercambio de archivos se basan en BitTorrent debido a su uso eficiente del ancho de banda [35]. Actualmente, existen muchos clientes BitTorrent independientes, pero todos siguen las especificaciones del protocolo original. Con el propósito de explicar el funcionamiento del protocolo BitTorrent, a continuación se definen los siguientes términos:

- Par (*peer*): Cliente BitTorrent que desea descargar un contenido digital.
- Vecindario (*neighborhood*): Conjunto de pares que colaboran de manera simultánea y directa con un par en la distribución de un contenido.
- Semilla (*seed*): Denominación que utiliza el protocolo BitTorrent para referirse a un par que tiene una copia completa del contenido digital y que se mantiene compartiéndola con los demás pares del vecindario.
- Sanguijuela (*leecher*): Denominación que utiliza el protocolo BitTorrent para referirse a un par que descarga un contenido digital.
- Enjambre (*swarm*): Conjunto de pares interesados en el mismo recurso digital y que pueden compartirlo, al menos parcialmente.
- Rastreador (*tracker*): Servidor con el que se comunican los pares que comparten algún determinado recurso digital, y que atiende peticiones de los pares que pertenecen al enjambre.

El rastreador registra a los pares que se encuentran participando en la distribución de contenidos digitales. Cuando un nuevo par se une al enjambre, el rastreador le proporciona un subconjunto de los pares que tiene registrados, los cuales se seleccionan aleatoriamente. En las versiones actuales del protocolo BitTorrent el ente rastreador puede ser redefinido como un sistema distribuido [20].

- Archivo con extensión *.torrent*: Archivo que contiene metainformación del contenido digital a compartir y la dirección electrónica del rastreador.
- Torrente (*torrent*): Referencia al contenido digital que se comparte en el enjambre.
- Pieza (*piece*): Fracción de un archivo de tamaño predeterminado. Unidad de intercambio.
- Bloque (*block*): Fracción de una pieza de tamaño predeterminado. Unidad de transferencia.

Analizando la puesta en marcha del protocolo BitTorrent se distinguen tres fases fundamentales:

- i. Publicación de contenido.
- ii. Localización de proveedores.
- iii. Descarga de contenido.

En la primera fase requerida (i), la publicación de un contenido digital típicamente consiste en crear y registrar un archivo con extensión *.torrent* en un servidor web que almacene este tipo de archivos. Continuando con la segunda fase (ii), al presentarse un par dispuesto a descargar un contenido digital tiene que solicitar al rastreador una lista de los pares que lo comparten. Como se puede observar en la figura 2.1, el primer paso (1) es obtener un archivo con extensión *.torrent* desde un servidor web (2). Este archivo contiene metainformación mediante la cual se tiene acceso a la dirección electrónica del rastreador correspondiente. Con esta información (3), el par se pone en contacto y se registra con el rastreador, el cual le regresa una lista de pares elegidos al azar que actualmente se encuentran compartiendo el contenido digital (4). En la versión original del protocolo BitTorrent la lista que devuelve el rastreador es de cincuenta pares como máximo.

Para comprender la manera en la que el rastreador monitoriza a los pares activos en el enjambre, esquemáticamente en la figura 2.2 se presenta el siguiente ejemplo: considerando que el par *D* se incorpora por primera vez al enjambre, el par comienza solicitando una lista actualizada de pares

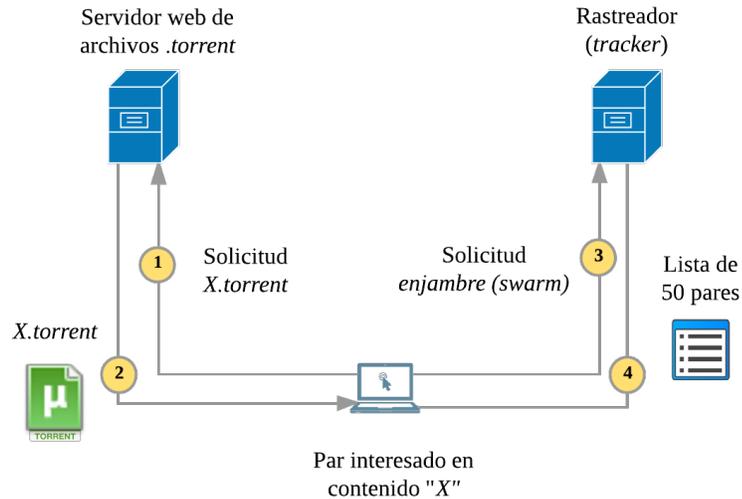


Figura 2.1: Proceso de localización del contenido del protocolo BitTorrent.

activos en la compartición del contenido al rastreador (1). Del conjunto de pares participantes, el rastreador selecciona aleatoriamente un subconjunto de pares y envía esta lista de participantes al par *D* (2). En el esquema podemos observar que los pares *A*, *B* y *C* (hasta ese momento) han notificado regularmente al rastreador que se encuentran activos en la compartición del contenido digital mediante el mensaje *Disponibile*, por lo tanto, el rastreador los selecciona. A medida que avanza el tiempo, se puede observar que el par *C* deja de notificar al rastreador que se encuentra activo en la compartición del contenido (probablemente esto se deba a que abandonó el enjambre). En consecuencia, el rastreador ajusta la lista de pares activos. En el momento que el par *D* (3) notifica al rastreador que se encuentra activo y solicita una nueva lista actualizada, ya *C* no se encuentra incluido en la respuesta (4). Asimismo, al incorporarse un nuevo par *E* al enjambre y solicitar la lista actualizada de pares activos al rastreador. El par *D* es seleccionado (5), puesto que previamente ha notificado su participación en la compartición del contenido al rastreador. De esta forma, el rastreador es capaz de monitorizar a los pares activos y atender las peticiones de los pares en el enjambre.

Cuando un par obtiene del rastreador una lista de pares que se encuentran compartiendo el contenido, la comunicación con dichos pares se establece directamente. A partir de entonces, el

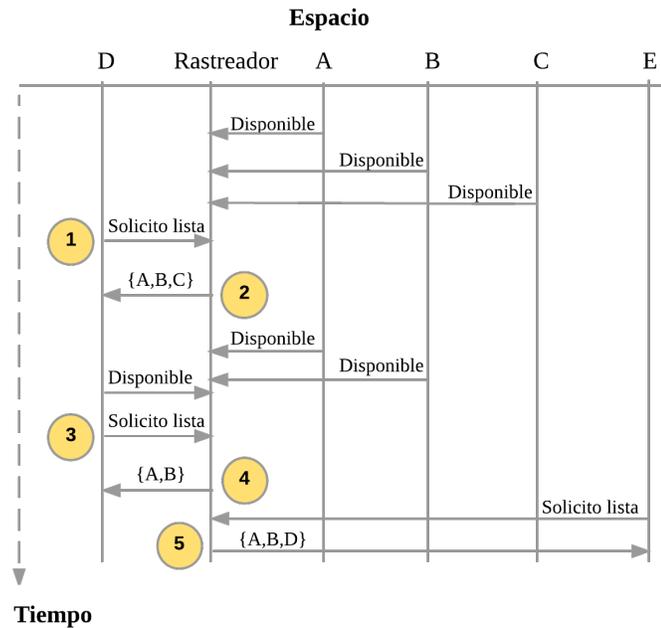


Figura 2.2: Monitorización de los pares activos en el enjambre por parte del rastreador.

intercambio de mensajes no requiere de la participación del rastreador.

Durante la fase de descarga (iii), el contenido digital se divide en piezas. Las cuales a su vez se dividen en bloques, la unidad de intercambio es la pieza, pero la unidad de transferencia es el bloque. En la especificación del protocolo BitTorrent original [40], el intercambio de mensajes para efectuar la compartición del contenido en un escenario ideal se representa en la figura 2.3. El par *A* comienza estableciendo conexión con el par *B* (1), para tal propósito utiliza el mensaje *Handshake*¹. A los pares con los cuales un par consigue establecer una conexión exitosa se les denomina pares vecinos.

A continuación, ambos pares intercambian el mensaje *Bitfield* (2), este tipo de mensaje indica las piezas que un par aloja. El par *A*, al procesar el mensaje *Bitfield* enviado por el par *B* conoce las piezas que este último posee. Es entonces cuando el par *A* envía el mensaje *Interested* al par *B* (3) si posee piezas que *A* aún no tiene, o en caso contrario, le enviará el mensaje *Not interested*.

Para suministrar piezas a los pares interesados, el par *B* determina un grupo de tres vecinos

¹Formalmente el protocolo que se utiliza para establecer la conexión entre pares se conoce como: «acuerdo de tres pasos» (*three way handshake*). Por simplicidad, la representación de dicho acuerdo se realiza mediante el mensaje *Handshake*.

termina la descarga completa de la pieza, envía un mensaje *Have* a todos los pares con los cuales ha establecido conexión, este mensaje indica cuál ha sido la pieza que recientemente ha descargado y verificado.

Adicionalmente a las estrategias mencionadas anteriormente, cuando los pares están por finalizar la descarga utilizan un mecanismo conocido como «fin del juego» (*endgame mode*). Durante este periodo los pares solicitan de forma activa a todos sus vecinos los bloques de la pieza que no tienen. Para no incurrir en envíos redundantes, cuando un bloque llega, todas las otras solicitudes relacionadas con este se suspenden. Para anular las peticiones de piezas previamente solicitadas, el protocolo BitTorrent utiliza el mensaje *Cancel*. En la práctica no se consume mucho ancho de banda en el periodo de «fin del juego» ya que este es breve [4].

Finalmente, como se observa en la figura 2.3 a partir del establecimiento del enlace de comunicación y del interés manifiesto de un par por adquirir piezas de un proveedor (3), el proceso se repite hasta que todas las piezas del contenido sean descargadas por todos los pares. En las siguientes subsecciones se puntualiza la estrategia de elección de pares a contactar y selección de pieza. Ambas estrategias son utilizadas por cada par, durante la descarga del contenido.

2.2.2 Elección de pares a desahogar

La estrategia de elección de vecinos a desahogar intenta mantener equidad en el intercambio del contenido y de esta forma prevenir que algunos pares se aprovechen de otros.

Recordemos que para iniciar una descarga un par obtiene del rastreador una lista actualizada de los miembros que se encuentran participando en la compartición del contenido digital. El par establece cuatro conexiones concurrentes con pares a los que les envía piezas. El algoritmo que utiliza cada par para la elección de pares a desahogar es descrito a continuación.

Algoritmo de ahogamiento/desahogamiento (*choking/unchoking*): Un par que contiene una copia o parte del contenido debe seleccionar los pares a los cuales se enviarán piezas. Para lograr este propósito se concede prioridad a los tres pares con mayor tasa de subida y entonces de forma recíproca, se envían piezas a esos mismos tres pares, este comportamiento se define como la estrategia del ojo por ojo (*tit-for-tat*). Un cuarto par es seleccionado al azar (*optimistic unchoke*), independientemente de su capacidad de velocidad de transferencia de datos de subida, para aumentar la probabilidad de beneficiar a pares que no tienen contenido y de esta forma impulsar

el intercambio del contenido entre todos los pares interesados. Periódicamente, cada diez segundos, se vuelve a calcular la capacidad de transferencia y, posiblemente, cambie el conjunto formado por los tres pares con mayor tasa de subida [13]. La elección del cuarto par (*optimistic unchoke*) es planificada cada treinta segundos.

2.2.3 Estrategia de selección de pieza

Como ya se ha anticipado, durante la descarga de un contenido, un par intercambia regularmente con cada uno de sus vecinos la lista de piezas de las cuales dispone. Con base en esta información, un par solicitará las piezas que no tiene. A continuación se describe el procedimiento de selección de pieza.

Algoritmo de selección de pieza conocido como «primero la más rara» (*rarest first*): La estrategia del algoritmo es solicitar piezas que son menos frecuentes en el vecindario. El propósito es garantizar una distribución uniforme de las piezas y evitar que los pares queden estancados en la descarga [4]. Como se muestra en la figura 2.4, cuando un par es desahogado por sus vecinos, en este caso los pares *A*, *B* y *C*, lo primero que se realiza es el cálculo de la frecuencia de las piezas. Al finalizar el conteo, aquella pieza con menor número de copias será la pieza más rara. En el ejemplo mostrado es importante resaltar que la pieza con índice dos, no se encuentra en ninguno de los vecinos que proveen piezas, por lo cual, no se considera.

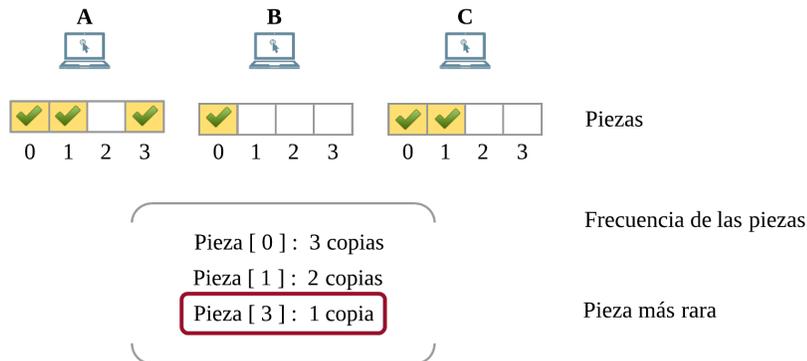


Figura 2.4: Selección de pieza menos frecuente en el vecindario. En rojo se resalta el índice e identificador de la pieza seleccionada.

En el contexto de la distribución de contenidos sobre Internet, han surgido diversos trabajos

relacionados con el mecanismo de selección de pieza del protocolo BitTorrent original. Con la finalidad de mejorar dicho mecanismo se han planteado diversas alternativas (algunas de ellas basadas en *network coding*). Sin embargo, en los experimentos realizados en [6] se da evidencia de que la estrategia de selección de pieza, con la que originalmente se diseñó BitTorrent, cumple con el propósito para la cual fue planteada.

2.3 Redes MANET

No hay duda de que los dispositivos de comunicación personales, tales como los teléfonos inteligentes, gozan de gran popularidad hoy en día. Muestra de este hecho es que estos dispositivos se han convertido en el modo predilecto mediante el cual los usuarios se conectan a Internet [13]. Teóricamente este tipo de dispositivos móviles permiten crear un tipo de red temporal conocida como MANET, en la cual los dispositivos, además de ser la fuente o destino de una conexión, también pueden convertirse en parte de una ruta que a través de retransmisiones permita comunicar dos nodos alejados entre sí. En esta sección se presentan los conceptos generales de las redes MANET.

2.3.1 Definición

Tal y como lo define el grupo de trabajo de redes MANET del IETF (*Internet Engineering Task Force*) [36]: Una red MANET es un sistema autónomo de encaminadores móviles y terminales finales asociadas (conocidos como «nodos») conectados por enlaces inalámbricos cuya unión forma un grafo arbitrario. Los nodos son libres de moverse y organizarse arbitrariamente; por lo tanto, la topología inalámbrica de la red puede cambiar rápida e impredeciblemente. Una red de este tipo puede operar de manera independiente, o puede tener conexión a una red con infraestructura fija.

2.3.2 Consideraciones acerca de las redes MANET

Además del uso del espacio como medio de comunicación, lo que distingue a las redes MANET de las cableadas es que en las primeras se eliminaron todos los principios generales acerca de los vecinos fijos y conocidos, la relación fija entre direcciones IP y la ubicación, las topologías fijas, etcétera [5]. La flexibilidad de este tipo de redes las hace atractivas para ser puestas en funcionamiento en escenarios donde no se cuente con infraestructura fija preexistente y se requiera de un despliegue

de comunicación rápida. Dentro de las características más representativas de las redes MANET se presentan las siguientes [36]:

- Topología dinámica: Los nodos pueden desplazarse libremente por un área determinada, además de poder entrar y salir de la red. Con lo cual, la topología de la red puede cambiar abruptamente y sin previo aviso.
- Enlaces de capacidad variable limitados en el ancho de banda: La capacidad del canal inalámbrico es variante en el tiempo y es significativamente inferior en comparación con el enlace cableado. De hecho, en una MANET integrada por n nodos el caudal de datos por nodo está limitado por $\Theta(c/\sqrt{n})$, donde c es una constante [8].
- Operación con restricción de energía: Los nodos en la red utilizan baterías, las cuales son difícil de recargar en cualquier momento. En este contexto, los mecanismos de optimización del consumo energético son relevantes para evitar un agotamiento prematuro de la fuente de energía.
- Heterogeneidad de nodos: Las capacidades y recursos informáticos disponibles a través del conjunto de nodos en la red pueden variar.
- Seguridad limitada: En términos generales, las redes inalámbricas, en comparación con las redes cableadas, son más vulnerables ante ataques que puedan comprometer la integridad de la red y los datos que circulan a través de ella. Por ejemplo, debido a que el medio de transmisión es el espacio, teóricamente cualquier usuario puede monitorizar el tráfico de la red para adquirir datos valiosos de otros usuarios. Por otra parte, debido a la naturaleza distribuida de una red MANET se reduce el riesgo de un punto único de falla.

En el ejemplo ilustrado en la figura 2.5, cuando un nodo A (origen) intenta enviar paquetes de datos a un nodo F (destino), al no encontrarse en un alcance de comunicación mutuo, la comunicación no se puede establecer directamente. Para establecer comunicación entre el origen y el destino, se requiere de la cooperación de los nodos intermedios B y D para la retransmisión de paquetes. Dado que los datos pueden pasar por diferentes nodos antes de llegar a su destino, se dice que la transmisión de paquetes se realiza de manera multisalto, tal y como lo indican las flechas en la ilustración.

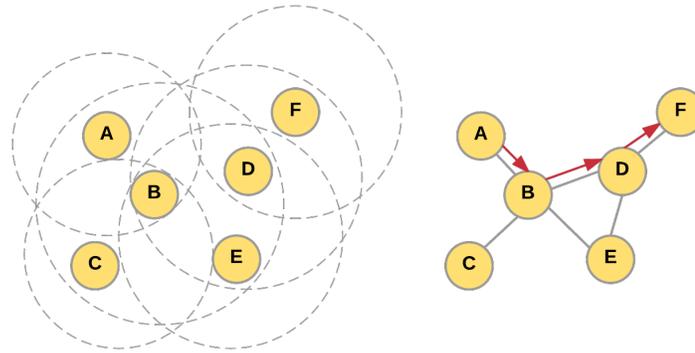


Figura 2.5: Red MANET [24]. A la izquierda se representa el alcance de comunicación inalámbrica de cada nodo (círculos punteados). A la derecha se resaltan las conexiones establecidas entre nodos y la ruta multisalto (flechas) para la transmisión de paquetes entre los nodos *A* y *F*.

Para establecer una ruta multisalto es necesario que todos los nodos involucrados utilicen el mismo protocolo de encaminamiento. El conjunto de reglas que especifica un protocolo de encaminamiento permiten el descubrimiento y mantenimiento de rutas entre los nodos de la red. Debido a que los nodos son móviles, las rutas pueden cambiar frecuentemente y de forma impredecible. Para determinar la selección de nodos intermediarios y la forma de descubrirlos se han propuesto múltiples protocolos de encaminamiento para redes MANET, los cuales de manera general se pueden agrupar en las siguientes tres categorías [24]:

- **Protocolos reactivos:** El proceso de descubrimiento de ruta inicia solo cuando un nodo origen lo solicita. Este mecanismo, como ya se mencionó, permite la comunicación entre un origen y un destino, donde ambos nodos se encuentran más allá del alcance mutuo de comunicación. Una vez que se configura la ruta que conecta el nodo origen con el nodo destino, se ejecuta un proceso de mantenimiento de ruta hasta que esta ya no sea requerida. Un inconveniente con este tipo de protocolos se presenta cuando existen numerosas peticiones de descubrimiento de ruta, con lo cual el medio de comunicación inalámbrico puede saturarse y ocasionar un deterioro en el desempeño de los servicios de red. A pesar de este problema, los protocolos reactivos son apropiados para entornos dinámicos. Algunos protocolos representativos de este

grupo son: *dynamic source routing (DSR)* y *ad hoc on-demand distance vector (AODV)*.

- Protocolos proactivos: Cada nodo difunde periódicamente las actualizaciones de las rutas de las que tiene conocimiento. La información actualizada de las rutas se transmite mediante paquetes de control que permiten a cada nodo en la red conservar sus tablas de encaminamiento consistentes. La movilidad o falla de un nodo puede provocar sobrecarga a la red, esto debido a la transmisión de paquetes de señalización que se requieren para reportar los cambios en la topología. Por lo anterior, la escalabilidad y el limitado ancho de banda disponible para la transmisión de datos son retos importantes en este tipo de protocolos de encaminamiento. Algunos protocolos representativos de este grupo son: *optimized link state routing (OLSR)* y *destination-sequenced distance-vector (DSDV)*.
- Protocolo híbridos: En términos generales, los protocolos proactivos, ante los cambios frecuentes en la topología de red, involucran una mayor sobrecarga de señalización al compararlos con los protocolos reactivos. Sin embargo, los protocolos reactivos involucran un retardo mayor en la adquisición de la ruta cuando se requiere enviar un paquete a un nuevo destino [22]. Los protocolos que fusionan las ventajas de los mencionados protocolos proactivos y reactivos se conocen como protocolos híbridos. La idea detrás de este enfoque es mejorar el rendimiento de la red, al menos en escenarios específicos. Un protocolo representativo de este grupo es: *zone routing protocol (ZRP)*.

2.3.3 Retos de la distribución de contenido digital sobre MANET

En este apartado se presentan los retos que impone la movilidad en las redes MANET para ofrecer un servicio de distribución de contenido digital. La transitoriedad de las conexiones (entre muchos otros factores) en este tipo de red influye en la topología, lo cual compromete el rendimiento de los protocolos de las capas superiores. El principal problema radica en que la mayoría de las aplicaciones que se pretenden poner en funcionamiento en el entorno MANET no toman en cuenta la movilidad de los nodos.

Dentro de los desafíos que impone la movilidad, se encuentran los siguientes. Primeramente, el desarrollo de un procedimiento para descubrir a un nodo móvil dentro de la red. Una vez descubierto, el siguiente reto es habilitar el reenvío de datos a ese nodo, lo cual implica la ejecución de un mecanismo de encaminamiento. Otro reto es mantener un mecanismo de restablecimiento de ruta

ante el desvanecimiento del enlace multisalto. Los protocolos de encaminamiento para MANET presentados en la subsección 2.3.2 proporcionan el soporte necesario para la gestión de rutas y encaminamiento de paquetes.

En este tipo de red cada nodo considera a otro nodo en la red como su igual y cada uno de ellos puede incorporarse o retirarse de la red de manera intermitente. Considerando estas características, resulta atractivo instrumentar un servicio de distribución de contenidos utilizando el paradigma P2P en el entorno MANET. Es importante resaltar que el modelo P2P alude a una red lógica superpuesta que se instala sobre la red física (MANET). La red P2P establece una abstracción de los enlaces que se encuentran en la red subyacente (conexiones físicas reales). De manera representativa en la figura 2.6 se ilustra una red de aplicaciones P2P (red lógica) que utiliza como soporte una red MANET (red física).

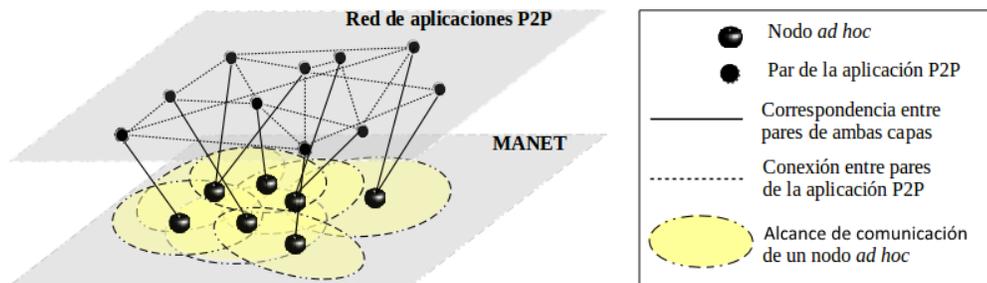


Figura 2.6: Red P2P sobre MANET [22].

En general, el problema de ofrecer un servicio de compartición de contenidos en el entorno MANET debe considerar una buena administración de los mensajes de señalización y envío de paquetes utilizados para la búsqueda y descubrimiento de nodos vecinos. Otro aspecto importante es el consumo de batería, ancho de banda y poder de cómputo utilizado. En el siguiente capítulo se presentarán las contribuciones realizadas en la comunidad científica para adaptar el popular protocolo de distribución de contenido digital BitTorrent al entorno MANET.

CAPÍTULO 3

Adaptación de BitTorrent al entorno MANET: perspectiva actual

Gran parte de los esfuerzos realizados en la comunidad científica para ofrecer un servicio de distribución de contenido digital usando el paradigma P2P en el entorno MANET son adaptaciones del protocolo BitTorrent y, en este capítulo, se hace una breve presentación de cada una de ellas (3.1) para, posteriormente, analizarlas según las modificaciones que la propuesta hace a la estrategia de elección de pares a desahogar (3.2), a la estrategia de selección de pieza (3.3) o a la arquitectura (3.4). En este capítulo también se presenta la metodología de validación utilizada en cada caso (3.5) enfatizando los modelos de movilidad utilizados. Para cerrar el capítulo se presenta una discusión (3.6) sobre la contribución de este proyecto al estado del conocimiento de la migración de BitTorrent hacia el entorno MANET.

3.1 Adaptación de BitTorrent al entorno MANET

Comenzando en orden cronológico, el protocolo BitTorrent fue diseñado para llevar a cabo la distribución de contenido digital utilizando el paradigma P2P y es ampliamente utilizado en redes cableadas como Internet, fue publicado por Bram Cohen en el año 2003. Este es el punto de partida de los proyectos que se examinan a lo largo del presente capítulo.

En el año 2006, Rajagopalan *et al.* [7] describieron el diseño de BTM (BitTorrent-MANET), el modelo propuesto es una versión simplificada del protocolo BitTorrent, el cual se basa en utilizar información de la topología de la red para tomar decisiones eficientes en el descubrimiento de pares en la capa BitTorrent.

El grupo de investigación *Planète* conformado por Sbai *et al.* [12] en el año 2008 propuso una arquitectura que permite la búsqueda y compartición de contenido digital sobre una red inalámbrica *ad hoc*, denominada BitHoc. En BitHoc se resalta la importancia que tiene la selección del vecindario

en el desempeño del protocolo BitTorrent. Posteriormente, en el año 2010 el mismo equipo de investigación presentó un protocolo basado en BitTorrent para realizar la compartición eficiente de contenido digital en redes MANET. Para diferenciar ambas aportaciones, en lo subsecuente se utilizan los nombres: BitHoc08 y BitHoc10, respectivamente (donde el sufijo numeral corresponde al año abreviado de publicación).

Seok *et al.* [15] plantearon un método para mejorar la eficiencia del protocolo BitTorrent adaptado al entorno MANET. La publicación de este trabajo se realizó en el año 2009. En esta propuesta Seok *et al.* se enfocan en optimizar el rendimiento de la descarga. Las estrategias propuestas para alcanzar dicho objetivo toman en cuenta aspectos como el ancho de banda, interferencia, movilidad y condiciones de los enlaces en la red. Estas propiedades no son tan relevantes en el diseño de protocolos utilizados en redes cableadas, pero en el contexto de las redes MANET repercuten en el desempeño del protocolo BitTorrent. Por simplicidad, en el resto del documento se hará referencia a esta propuesta como Seok.

Otro precedente para instrumentar BitTorrent en el entorno MANET se produjo en el año 2011, en donde Quental *et al.* [25] presentaron una extensión de BitTorrent diseñada para MANET, denominada Mobile-BitTorrent. Esta extensión adopta estrategias específicas en la capa de aplicación para la selección y distribución del contenido digital.

Los proyectos citados anteriormente se exhiben por año de aparición en la figura 3.1. En las secciones posteriores se hará referencia a cada propuesta de acuerdo con la designación que reciben en esta línea de tiempo.

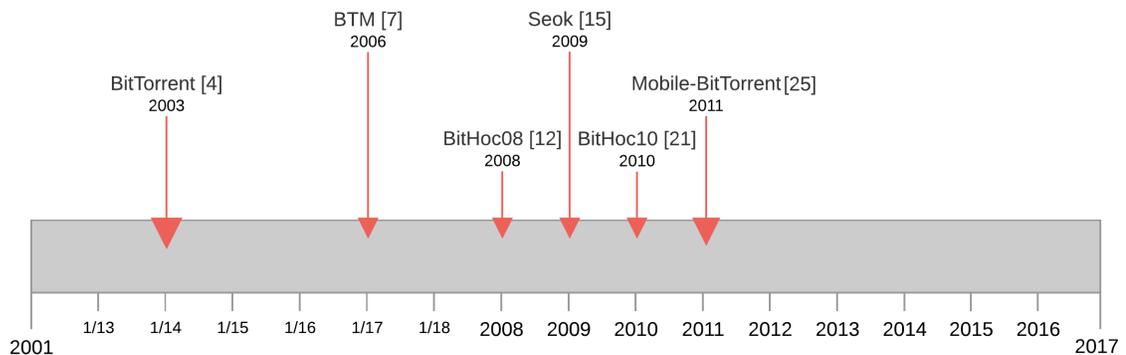


Figura 3.1: Propuestas analizadas en el estado del conocimiento.

A continuación se analizan los trabajos estudiados en el estado del conocimiento desde tres puntos de vista. El primero explora las estrategias propuestas para la elección de los pares a desahogar (donde la consideración de la topología de la red es relevante). El segundo se ocupa de las estrategias para la selección de pieza a solicitar. Finalmente, a manera de complemento a la clasificación anterior, se presenta un tercer análisis en el que se destaca la arquitectura planteada en cada proyecto.

3.2 Estrategias identificadas para la elección de pares a desahogar

En el proyecto BitHoc08 se considera limitar el alcance de selección de vecindario para reducir la sobrecarga de encaminamiento y mejorar el caudal de datos (*throughput*) en la red. Para obtener las distancias (número de saltos) entre pares en la red se utilizan los datos proporcionados por el protocolo de encaminamiento.

La idea es que cada par mantenga localmente una «tabla de vecinos cercanos» (localizados a dos saltos o menos, denominada *NNT*, *near neighbor table*) y una «tabla de vecinos lejanos» (localizados a más de dos saltos, denominada *FNT*, *far neighbor table*). Con la clasificación de vecindario cercano y lejano se seleccionan a los tres vecinos con la mejor capacidad de subida considerando a los pares de ambas tablas. La cuarta conexión se establece de manera optimista: durante q ranuras de tiempo la selección optimista del par se realiza a partir del índice *NNT*. Posterior a este periodo, la elección del par se lleva a cabo una sola vez considerando el índice *FNT* y así el proceso se repite. El objetivo del parámetro q es lograr un balance en la ronda de desahogo optimista entre pares cercanos y lejanos utilizando una política de planificación circular (*round robin*).

Las observaciones reportadas en el proyecto BitHoc08 impulsaron la propuesta BitHoc10, que expone una estrategia de conformación del vecindario organizando a los pares en un árbol de expansión mínimo (*spanning tree*), el cual se construye utilizando el protocolo de administración de membresía propuesto en [18]. La estrategia propone que el esfuerzo principal de un par sanguijuela debe concentrarse en la compartición del contenido seleccionando a los pares localizados a un salto lógico en el árbol de expansión mínimo, esta región recibe el nombre de **área de compartición**. Las semillas se encargan de la diversificación de piezas evitando sobrecargar la red con prolongadas rutas multisalto. Siguiendo esta estrategia, son las semillas quienes dirigen sus esfuerzos y recursos en proveer piezas del contenido a pares que se localizan más allá de la denominada área de compartición,

nombrada **área de diversificación**.

En BitHoc10, a medida que proliferan las semillas, se propone compartir el esfuerzo de diversificación de piezas entre las semillas. Para ello, la ronda de desahogamiento optimista de una semilla se administra considerando la cantidad de semillas que están atendiendo la misma área de diversificación. El cambio en la planificación para atender a pares que se ubiquen en el área de diversificación es igual al número de semillas que alcanzan a cubrir la misma región, es decir, cuando solo existe una semilla atendiendo un área de diversificación la cuarta conexión de esta se encarga de suministrar el contenido a los pares localizados en el área de diversificación. Si existen dos o más semillas atendiendo la misma área de diversificación, la cuarta conexión de las semillas se planifica cada q ranuras de tiempo (donde q es igual al número de semillas) para atender a los pares ubicados en el área de diversificación. Para las $q-1$ ranuras de tiempo restantes, las semillas dedican su cuarta conexión optimista a servir a los pares en el área de compartición.

El periodo de renovación del conjunto formado por los cuatro pares tanto para la adaptación BitHoc08 como BitHoc10 se establece en cuarenta segundos. Este cambio con respecto a la configuración original de BitTorrent (subsección 2.2.2) permite incrementar el periodo de compartición de piezas.

Por otra parte, el algoritmo de selección de vecinos planteado en Seok utiliza tablas que contienen el costo asociado a la selección de un determinado par i . La premisa de la cual parte esta propuesta es considerar el ancho de banda disponible como la velocidad de transferencia. Por lo tanto, el costo se calcula con la fórmula $C_i = H_i/B_i$, donde H_i es el contador de saltos al par i , mientras que el parámetro B_i es el mínimo ancho de banda disponible en el trayecto al par i . El método de selección de par consiste en seleccionar al par que tiene el valor B_i más grande cada q ranuras de tiempo y seleccionar al par que tiene el valor C_i más pequeño durante las $q-1$ ranuras de tiempo restantes. La selección del vecindario continúa con esta estrategia hasta que se alcanza el límite máximo de conexiones del par. Para considerar los cambios en la topología de la red, se utilizan los datos proporcionados por el protocolo de encaminamiento.

En la tabla III.1 se presenta un resumen de los esfuerzos identificados en el estado del conocimiento, para realizar la elección de pares. Se incluye el protocolo BitTorrent original como punto de referencia.

Tabla III.1: Estrategias para la elección de pares.

Proyecto	Criterio	Cantidad	Duración
BitTorrent [4]	Mejor tasa de subida	3	10 s
	Aleatorio	1	30 s
BTM [7]	Mejor tasa de subida	3	10 s
	Aleatorio	1	30 s
BitHoc08 [12]	Mejor tasa de subida	3	40 s
	Diversificación	1	40 s
Seok [15]	Mejor costo en tiempo o ancho de banda	4	No descrito
BitHoc10 [21]	Mejor tasa de subida (área de compartición)	3	40 s
	Aleatorio	1	40 s
Mobile-BitTorrent [25]	Mejor tasa de subida	3	10 s
	Aleatorio	1	30 s

3.3 Estrategias identificadas para la selección de pieza

En el proyecto BitHoc08 se define una estrategia de selección de pieza denominada «pieza ausente» (*absent piece*). El enfoque de esta estrategia es solicitar una pieza a un par lejano siempre y cuando no exista en el vecindario cercano. En caso de advertir más de una pieza inexistente en el vecindario cercano, la selección de «pieza ausente» a solicitar se realiza de manera aleatoria, a partir del conjunto de piezas ausentes identificadas. La estrategia «pieza ausente» tiene la intención de reducir la sobrecarga de encaminamiento en la red. Para el caso de selección de pieza en el vecindario cercano la propuesta es seleccionar primero la más rara.

En Seok se propone una estrategia para la solicitud de pieza, donde la principal condición es ubicar a los pares que están detrás de otros pares, llamados «pares sombreados» (*shaded peers*)¹. Con base en esta distinción, un par que está entre un proveedor de piezas y un «par sombreado» dispone de las piezas que el proveedor conserva, para posteriormente atender las solicitudes de piezas que el «par sombreado» realiza. De esta forma no existen transmisiones repetidas.

Para brindar claridad respecto al término «par sombreado», en la figura 3.2 se muestra un ejemplo de una transferencia P2P ineficiente. En la ilustración, partimos de la suposición de que el par *A* conserva una copia completa del contenido digital. Bajo este supuesto, el par *B* se encuentra localizado entre el par *A* y el par *C*, de donde este último califica como «par sombreado». Si el

¹Término acuñado por los autores.

par *C* envía una solicitud para adquirir la pieza *X* al par *A*, este enviaría dicha pieza al par *C*. Para tal propósito la pieza *X* es encaminada por el par *B* (1). La aplicación P2P del par *B* no recibe la pieza. Llegado a este punto, una de las posibles causas que provocaría redundancia en la transferencia de la pieza *X* sería que el par *B* enviara una solicitud para adquirir dicha pieza al par *C*. En consecuencia, el par *C* envía la pieza *X* de vuelta al par *B* (2). En contraste con el desenlace anterior, si el par *C* no envía una solicitud al par *A*, el par *B* eventualmente recibirá la pieza *X* del par *A*. La finalidad es que el par *C* pueda recibir la pieza *X* del par *B*.

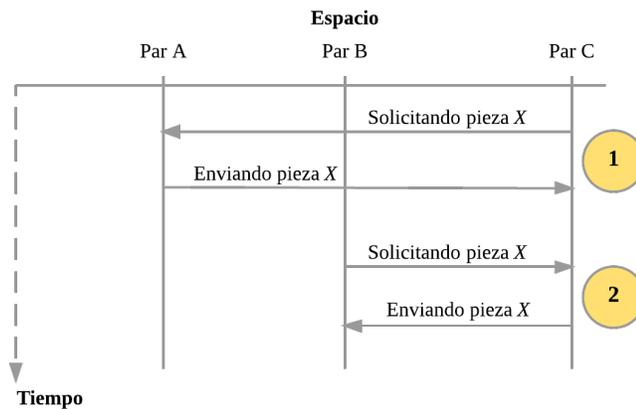


Figura 3.2: Descarga P2P ineficiente considerando a un par «sombreado» [15].

Para identificar a los denominados «pares sombreados» se realizan modificaciones en el protocolo de encaminamiento. De esta forma, los pares pueden detectar a los pares sombreados mientras intercambian mensajes en la capa BitTorrent.

En la propuesta BTM el criterio de selección de pieza se realiza de manera aleatoria. Aunado a esto, en BTM por cada conexión que un par establece con sus vecinos, solo se informa una vez sobre las piezas que dicho par tiene. Es pertinente resaltar que debido a este modelo simplificado del protocolo BitTorrent los pares pueden recibir piezas duplicadas, lo que implica un consumo mayor de energía y ancho de banda en la red [14].

Por último, en Mobile-BitTorrent, la semilla (denominado par difusor) periódicamente realiza transmisiones de algunas piezas del contenido mediante difusión (*broadcast*). El par difusor nunca envía más de una vez la misma pieza mediante *broadcast* y solo los pares sanguijuela (denominados pares comunes) localizados a un salto pueden adquirir y procesar este tipo de mensajes.

Un par difusor es responsable de decidir qué piezas serán seleccionadas para ser transmitidas mediante *broadcast*. Debido a que un par difusor también responde a las solicitudes de piezas que realizan los pares comunes mediante enlaces punto a punto (*unicast*), el criterio que utiliza el par difusor para determinar qué pieza será enviada mediante *broadcast* es el de la pieza más rara siguiendo un orden ascendente según el índice de las piezas en caso de empate. En caso de que solo exista una pieza rara, el par difusor tiene el compromiso de evitar escoger la misma pieza que sería solicitada mediante (*unicast*) por los pares comunes. Para cumplir con este propósito, el par difusor selecciona la segunda pieza más rara y así el proceso continúa.

Los pares comunes colaboran con otros pares y utilizan los mensajes *unicast* y *broadcast* para completar su descarga. Los pares comunes solicitan primero la pieza más rara, pero eligiendo las piezas en orden descendente a partir del índice de la pieza en caso de empate para no incurrir en la adquisición de piezas redundantes.

En la tabla III.2, se presenta un listado general de las estrategias identificadas para realizar la selección de pieza. Se considera el protocolo BitTorrent original como punto de referencia.

Tabla III.2: Estrategias para la elección de piezas.

Proyecto	Criterio	Unidad de intercambio	Inicio	Final
BitTorrent [4]	Primero la más rara	Subpieza	Aleatorio	Fin del juego
BTM [7]	Primero la más rara	Subpieza	Aleatorio	Fin del juego
BitHoc08 [12]	Primero la más rara y pieza ausente	Subpieza	Aleatorio	Fin del juego
Seok [15]	Primero la más rara	Subpieza	No descrito	No descrito
BitHoc10 [21]	Primero la más rara	Subpieza	Aleatorio	Fin del juego
Mobile-BitTorrent [25]	Primero la más rara	Subpieza	Aleatorio	Fin del juego

3.4 Arquitectura de las propuestas

En el estado del conocimiento se ha explorado la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET como una alternativa para ofrecer el servicio de distribución de contenido digital de forma eficiente. De manera general y con base en su arquitectura los esfuerzos se pueden clasificar en dos conjuntos: el primer conjunto (BTM, BitHoc08, Seok, y BitHoc10) propone utilizar una arquitectura inalámbrica de capa transversal (*cross-layer*) y el segundo grupo (Mobile-BitTorrent) propone seguir

con la arquitectura inalámbrica convencional (estándar IEEE 802.11).

En esencia, la idea de diseñar una arquitectura de capa transversal es utilizar información de los protocolos de encaminamiento para tomar decisiones en la capa de aplicación, de este modo la selección del vecindario se realiza considerando las posiciones físicas que ocupan los nodos en la red. En el segundo conjunto, la propuesta es aprovechar las características del medio inalámbrico para optimizar el rendimiento de BitTorrent en el entorno MANET. Las estrategias propuestas principalmente procuran reducir el tiempo para efectuar descargas completas sin generar una sobrecarga excesiva en la red para alcanzar tal propósito. Las aportaciones realizadas recaen en la capa de aplicación debido a que no se recurre a interacciones cruzadas en la tradicional pila de protocolos.

En la tabla III.3 se presenta la arquitectura utilizada en las propuestas analizadas en este capítulo. Adicionalmente, en la figura 3.3 se resumen de forma esquemática las propuestas analizadas en el estado del conocimiento. En ambos esquemas se considera al protocolo BitTorrent original como punto de referencia.

Tabla III.3: Arquitectura empleada en las propuestas.

Proyecto	Arquitectura
BitTorrent [4]	Capa superpuesta sobre Internet
BTM [7]	Capa transversal
BitHoc08 [12]	Capa transversal
Seok [15]	Capa transversal
BitHoc10 [21]	Capa transversal
Mobile-BitTorrent [25]	Capa superpuesta sobre 802.11g

3.5 Validación de las propuestas

Otra observación importante en el análisis de las propuestas descritas anteriormente tiene que ver con la forma en la cual los autores validaron sus hipótesis. En la mayoría de los trabajos, la simulación es la herramienta predilecta para la evaluación de las propuestas. Lo anterior sugiere que este tipo de experimentación usualmente es aplicada en el estudio del protocolo BitTorrent sobre MANET.

A continuación, en la tabla III.4 se presenta la configuración de los escenarios de simulación de las propuestas analizadas en el estado del conocimiento.

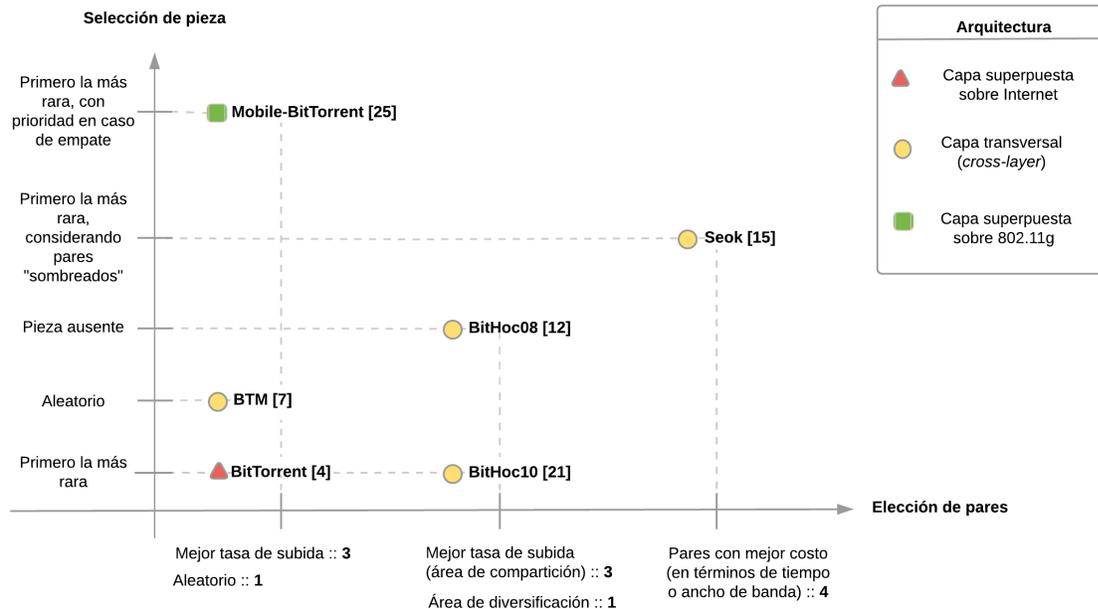


Figura 3.3: Clasificación de propuestas analizadas en el estado del conocimiento.

Tabla III.4: Escenarios de simulación de las propuestas.

Proyecto	# Nodos*	Alcance de comunicación inalámbrica	Área de simulación	Protocolo de encaminamiento
BTM [7]	50	250 m	2000 m × 500 m	ANSI
BitHoc08 [12]	40	50 m	No se especifica	DSDV
Seok [15]	49	230 m	No se especifica	OLSRv2
BitHoc10 [21]	50	50 m	100 m × 500 m	OLSR
Mobile-BitTorrent [25]	49	50 m	150 m × 150 m	OLSR

*Cantidad máxima de nodos considerados

En la tabla III.5 se destaca el modelo de movilidad utilizado para la evaluación de cada propuesta, en algunos casos también se especifica el tamaño del contenido digital a compartir en el escenario de simulación.

Tabla III.5: Modelo de movilidad utilizado en los escenarios de simulación de las propuestas.

Proyecto	Modelo de movilidad	Velocidad*	Tiempo de pausa	Tamaño del contenido digital
BTM [7]	<i>Random waypoint</i>	20 m/s	0 s	1000 Bytes
BitHoc08 [12]	Nodos estáticos	–	–	10 Mbytes
Seok [15]	<i>Random waypoint</i>	10 m/s	30 s	No se especifica
BitHoc10 [21]	<i>Random waypoint</i>	2 m/s	2 s	10 Mbytes
Mobile-BitTorrent [25]	Nodos estáticos	–	–	100 Mbytes

*Velocidad máxima considerada

3.6 Discusión

En este capítulo se analizaron las propuestas del estado del conocimiento para la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET. El estudio de cada propuesta se centró en el diseño de la arquitectura y de las estrategias, tanto para la elección de pares a desahogar como para la selección de pieza. A partir de dicho análisis, es posible observar el reto que impone la movilidad de los nodos para el despliegue de un servicio eficiente de distribución de contenido digital P2P en el entorno MANET.

Se podría intuir que, en un entorno MANET con alta movilidad, las rutas establecidas podrían ser más propensas a sufrir desvanecimientos en cualquier momento y sin previo aviso. Con lo cual, cualquier adaptación del protocolo BitTorrent en este tipo de red no dispondría del tiempo suficiente para realizar la transferencia del contenido digital, o al menos, no de manera eficiente. De hecho, los efectos que la movilidad causa al tiempo de vida de las rutas influyen directamente en el tiempo de vida de los enlaces lógicos [33].

Por otra parte, la opción más recurrente en las adaptaciones del protocolo BitTorrent para detectar los cambios en la topología dinámica en el entorno MANET fue utilizar una arquitectura de capa transversal (*cross-layer*). Con esta alternativa arquitectural, la capa de aplicación interactúa con los protocolos de encaminamiento para obtener información acerca de los cambios de la topología. Sin embargo, es importante considerar el riesgo que implicaría comprometer el diseño modular de la pila de protocolos. Por ejemplo, si los protocolos están estrechamente relacionados podrían causar interferencias mutuas entre capas. Además, el mantenimiento de este tipo de arquitectura es una tarea desafiante [29].

Finalmente, con los retos planteados anteriormente, la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET sigue siendo objeto de interés para la comunidad científica. En el ámbito de las propuestas analizadas, el problema no ha sido estudiado desde el enfoque de la movilidad humana. De este modo, una tarea pendiente es analizar la efectividad de las estrategias propuestas por cada protocolo bajo un marco uniforme y realista de evaluación. Por ello, en los subsecuentes capítulos se presenta la configuración y evaluación de las adaptaciones del protocolo BitTorrent al entorno MANET bajo consideraciones de la movilidad humana, lo cual constituye uno de los aportes del presente proyecto de investigación.

CAPÍTULO 4

Consideraciones sobre la movilidad humana y metodología experimental

Para medir el desempeño relativo de las estrategias planteadas en la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET es necesario definir un marco de evaluación uniforme e imparcial. Para hacer frente a esta valoración de las propuestas, en este proyecto de investigación se considera un modelo de simulación razonablemente detallado que incorpora todos los elementos relevantes para nuestro estudio. Por tal motivo, en la siguiente sección se presentan varios descubrimientos sobre la movilidad humana (4.1). Después, se exponen las herramientas (4.2) que se utilizaron para realizar la evaluación de cada protocolo. De igual forma se resaltan los modelos utilizados tanto para representar las propiedades de la movilidad humana (4.2.1), como para abstraer el funcionamiento del protocolo BitTorrent (4.2.2). Posteriormente, se presentan las medidas de desempeño (4.3) y la configuración de los experimentos (4.4) que se plantearon para realizar la evaluación de las propuestas.

4.1 Descubrimientos sobre la movilidad humana

La falta de realismo en los entornos de simulación de redes MANET ha sido ampliamente explorada en [8, 9, 29], donde las observaciones se plantean tanto desde el punto de vista técnico como del socioeconómico. Entre algunos de los puntos señalados se puede resaltar la utilización de modelos de movilidad que no representan varias de las características del movimiento humano para la evaluación de protocolos en el entorno MANET. Este hecho ha cobrado relevancia debido a los siguientes descubrimientos realizados sobre este campo:

- i. La magnitud de los desplazamientos entre dos destinos intermedios del recorrido realizado por una persona (puntos de recorrido), así como el tiempo que permanece sin movimiento

- en estos destinos (pausas) presentan características estadísticas que se ajustan a una distribución de cola pesada [26].
- ii. La gente tiende a desplazarse en áreas confinadas [10]. Sin embargo, como la experiencia lo dicta, personas diferentes pueden tener áreas de movilidad totalmente distintas.
 - iii. Las personas tienden a visitar los destinos más próximos en su recorrido actual cuando visitan diferentes lugares en un único viaje [27].
 - iv. El tiempo que transcurre entre dos encuentros de un mismo par de personas puede ser modelado con una distribución de cola pesada [19].
 - v. La gente tiende a visitar áreas consideradas populares, creando un fenómeno de agrupamiento que puede ser observado a diferentes escalas espaciales [27].

En función de la movilidad inherente de los nodos en una MANET, la adaptación del protocolo BitTorrent impone desafíos técnicos más complejos en este tipo de red en comparación con los desafíos que imperan en las redes con infraestructura fija. Más aún, al ignorar las propiedades topológicas de la red MANET inducidas por el movimiento de las personas se compromete la escalabilidad, nivel de sobrecarga y equidad del sistema. En este punto, la mayoría de las propuestas procuran distinguir los diferentes puntos de conexión que un nodo puede tener en la red a lo largo del tiempo, estos datos son considerados en la toma de decisiones para mantener el servicio de distribución del contenido digital (siempre que sea posible). Sin embargo, el marco de evaluación de cada propuesta carece de los elementos necesarios para el diseño de experimentos más apegados a la realidad, particularmente desde el punto de vista de la movilidad humana. En general, con el conocimiento previamente reportado en 4.1(i)-(v), es posible comprender mejor las limitaciones de los enlaces de comunicación y los cambios en la topología de la MANET. Con dicho entendimiento, la evaluación de rendimiento relativo de las propuestas puede ser planteada de manera más realista con respecto a la movilidad de las personas. Para ello a continuación se definen las herramientas y modelos utilizados para alcanzar dicho objetivo.

4.2 Entorno de simulación

La mayoría de las investigaciones relacionadas con la adaptación del protocolo BitTorrent al entorno MANET utilizan la simulación por computadora como herramienta para la comprobación de sus hipótesis. La simulación se refiere a un gran conjunto de métodos y aplicaciones que buscan imitar el comportamiento de sistemas reales, generalmente con un programa informático (*software*) apropiado. Los componentes lógicos que conforman una simulación son la abstracción de las entidades en el mundo real, con lo cual es más fácil definirlos y hacerlos interactuar entre sí. A continuación se describen algunas ventajas que se deben considerar al utilizar esta estrategia de evaluación.

- Estudio de sistemas complejos a bajo costo. Sobre todo, si se compara con el despliegue de un sistema real el cual podría resultar más costoso.
- Los cambios en el modelo no son tan complicados y no suponen un riesgo (pues solo se trata de una abstracción).
- Facilidad de evaluación de un modelo de sistema bajo condiciones diferentes de cargas de trabajo y entornos.
- La flexibilidad y facilidad de los programas informáticos de simulación permiten el análisis detallado de un gran número de elementos.

Algunas de las posibles desventajas de este esquema son:

- Errores en el funcionamiento del simulador (lo cual puede conducir a conclusiones equivocadas).
- Cambios imprevistos en la tecnología que podrían provocar una migración parcial o completa del modelo de simulación.
- Debido a cambios imprevistos en los programas informáticos de simulación es probable que la compatibilidad entre versiones se comprometa. Tal es el caso de ciertos modelos de simulación que dependen de la integración de las bibliotecas de una versión anterior de un simulador, y que en una versión actual del mismo no funcionan o al menos no de manera adecuada.

- Si el modelo de simulación es demasiado simplificado, lo más probable es que no sea una representación válida del sistema.

A partir de los puntos anteriores, en este proyecto de investigación la fase de experimentación se realiza mediante la simulación por computadora. Así, el entorno de simulación que se utilizó fue OMNeT++ [38] versión 4.2.2. Este simulador de eventos discretos fue escrito en C++ y se ha utilizado en sistemas operativos como GNU-Linux, MAC OS-X y Windows. Actualmente, OMNeT++ es *software* de libre distribución para fines académicos y se utiliza para analizar sistemas de diferentes dominios. Uno de los componentes principales de OMNeT++ es su arquitectura de componentes la cual permite la creación de módulos de simulación. Los módulos son programados en C++ y encapsulan el comportamiento del modelo que se intenta representar, la conexión entre estos elementos se establece mediante sus «compuertas». El paso de mensajes entre los módulos se puede establecer de manera directa (lo cual es particularmente útil para la simulación de redes inalámbricas), o a través de rutas predefinidas utilizando sus compuertas. Para la creación de redes MANET en el entorno de simulación OMNeT++ se utilizaron las bibliotecas de código abierto del simulador INET [37] versión 2.1.0. Enseguida se describen los modelos utilizados para el diseño e implementación de los escenarios de simulación.

4.2.1 Modelo de movilidad humana

Uno de los modelos de movilidad peatonal que captura los hallazgos citados en 4.1 es SLAW (*self-similar least-action walk*) [27]. Este modelo produce trazas de recorrido sintéticas, con las cuales es posible replantear la evaluación de desempeño de las adaptaciones del protocolo BitTorrent al entorno MANET bajo consideraciones de movilidad que se asocian mejor a los desplazamientos de las personas. El modelo SLAW fue inspirado en el principio de «menor acción» (*least-action*), cuya hipótesis en el contexto de la movilidad humana indica que las personas procuran realizar recorridos que reduzcan su incomodidad [27]. En este caso, la incomodidad es la distancia asociada a un trayecto. A continuación se describen brevemente las condiciones y reglas que contempla el modelo SLAW para determinar el movimiento de los nodos en la red. Vale la pena aclarar que el modelo de movilidad SLAW que se utilizó en este proyecto de investigación fue el desarrollado en [34].

Los puntos de recorrido (*waypoints*) utilizados por el modelo pueden ser generados de una manera autosimilar o bien pueden ser extraídos de una traza GPS (*global positioning system*) [28]. Estos puntos de recorrido constituyen el universo W de todos los posibles destinos que pueden ser alcanzados por los nodos en la red. La distribución de los puntos de recorrido en el plano P se modela de manera autosimilar. El parámetro de Hurst (H) controla el grado de autosimilitud [27].

Para considerar el hecho de que las personas cotidianamente tienden a moverse en áreas confinadas [10], el modelo de caminata individual (*individual walker model*) está implementado en SLAW. Dicho modelo fuerza el movimiento de los nodos a una subsección predefinida del plano P . Para ello, a partir del total de puntos de recorrido W se definen áreas confinadas mediante la conexión transitoria de dichos puntos dentro de un radio r medido en metros. Siendo así, el conjunto de áreas confinadas definidas como $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ y $|c_i|$ la cardinalidad de la i -ésima área confinada, es posible asignar un peso $w_i = |c_i|/|W|$ a cada área confinada i . Enseguida, cada nodo elige k áreas confinadas de C con una probabilidad linealmente proporcional a los pesos w_i asignados a cada área.

Una vez que los nodos tienen asignado un conjunto C_k de áreas confinadas, lo siguiente es definir un punto de partida e iniciar un viaje. El punto inicial del recorrido puede ser seleccionado arbitrariamente de C_k . A partir de esta selección preliminar, un nodo dispone de entre ciento veinte y ciento cincuenta puntos de recorrido tomados de las áreas confinadas de C_k para elegir el siguiente punto de recorrido. Para considerar los casos en que las personas no siempre siguen el mismo itinerario, un área confinada del conjunto C_k se reemplaza por otra, la cual no forma parte del conjunto C_k y que es seleccionada aleatoriamente (ignorando los pesos w_i) [27].

Finalmente, se modela la característica de que las personas deciden su próximo destino en un viaje considerando como factor principal la distancia [27]. El modelo de movilidad SLAW utiliza el algoritmo de «planeación de recorrido de menor acción» o LATP (*least-action trip planning*). Básicamente, el algoritmo LATP recibe como parámetro un conjunto desordenado de puntos de recorrido WW a visitar y un punto inicial de recorrido w , y regresa un conjunto ordenado WW_0 de todos los puntos de recorrido WW comenzando por w [28]. Propiamente, el algoritmo determina el siguiente punto de recorrido que un nodo va a visitar tomando como referencia la distancia que hay entre la ubicación actual del nodo y los destinos que no ha visitado [34]. En el algoritmo 1 se presenta el procedimiento LATP. Tomando como base este pseudocódigo, el parámetro α en la ecuación $p_i = \frac{(1/d_i)^\alpha}{\sum_j (1/d_j)^\alpha}$ es utilizado para ajustar el principio de mínima acción: si α es infinito, el

algoritmo siempre escoge el punto de recorrido más cercano que no se ha visitado; por otra parte, si α es cero, entonces la selección es uniformemente aleatoria [17]. Cada vez que un nodo llega a su destino, el nodo permanece en esa ubicación durante un tiempo de pausa, dicho periodo de pausa es muestreado de una distribución de Pareto truncada. El algoritmo termina cuando el caminante visita todos los puntos de recorrido.

Algoritmo 1 LATP [28]

Entrada: Conjunto WW de puntos de recorrido en el itinerario

Entrada: Punto de recorrido inicial $w \in WW$

Entrada: Factor de ponderación de distancia $\alpha \geq 0$

Entrada: cw definido como el punto de recorrido actual

Salida: Conjunto WW_o ordenado de puntos de recorrido

- 1: $WW_o = \{w\}$; $cw = w$
 - 2: **mientras** $WW_o \neq WW$ **hacer**
 - 3: Calcular distancia d_i para todo $w_i \in WW - WW_o$
 - 4: Calcular probabilidad p_i para desplazar el punto de recorrido w_i como:

$$p_i = \frac{(1/d_i)^\alpha}{\sum_j (1/d_j)^\alpha}$$
 - 5: Elegir un nodo w' en $WW - WW_o$ de acuerdo a la probabilidad p_i
 - 6: $cw = w'$; $WW_o = WW_o \cup \{w'\}$
 - 7: **fin mientras**
 - 8: **devolver** WW_o
-

4.2.2 Modelo BitTorrent

El modelo EbitSim (*enhanced BitTorrent simulation*) [23] fue diseñado para mantener el nivel de detalle y realismo del funcionamiento del protocolo BitTorrent en un entorno de simulación. La escalabilidad es un factor importante en el planteamiento de EbitSim, con lo cual es posible realizar simulaciones de un gran número de elementos en la red y manejar diversos escenarios de distribución de contenidos de manera concurrente. La implementación del modelo está programado sobre OMNeT++ en conjunto con INET.

Las funcionalidades del modelo EbitSim están codificadas en C++, tanto la abstracción de los pares y el ente rastreador se modelan como aplicaciones desarrolladas para redes cableadas. Uno de los aportes relevantes de este modelo es el uso de máquinas de estado para la descripción del procesamiento dinámico de los mensajes que utiliza el protocolo BitTorrent. El tiempo de procesamiento de cada mensaje se muestrea de un modelo probabilístico construido a partir de una traza del mundo real.

Para la construcción de nuestro entorno de simulación, en primer término fue necesario integrar una versión de INET que incluyera las abstracciones correspondientes al entorno MANET, en particular, protocolos de encaminamiento adecuados y la consideración de modelos de movilidad. Como ya se mencionó, en nuestro caso utilizamos la implementación del modelo SLAW descrita en la subsección previa.

Enseguida, adaptamos EbitSim de la siguiente manera. Por un lado, debido a que el presente proyecto de investigación se enfoca en la fase de descarga del contenido digital, se omitió la fase de localización del contenido. Esto se hizo incorporando en cada par un módulo para la adquisición periódica de la lista actualizada de los pares que se encuentran compartiendo el contenido. Por otro lado, los módulos originales del proyecto EbitSim se configuraron para el uso del estándar 802.11g en modo *ad hoc*. Los protocolos a evaluar se construyeron partiendo de esta versión modificada de EbitSim.

Finalmente, se construyeron los protocolos a evaluar. Con el fin de preservar la claridad y la flexibilidad de EbitSim, los ajustes se realizaron manteniendo el esquema modular que plantea el modelo original. A continuación se anuncian los aspectos que se incluyeron en la versión modificada de EbitSim para obtener cada uno de los protocolos:

- Para BTM se cambió el mecanismo de selección de pieza por uno aleatorio.
- En BitHoc08, al incorporar la movilidad, la distinción entre vecinos lejanos y cercanos se desvanece. En consecuencia, para tener actualizados los índices es necesario recalcularlos periódicamente. La estrategia de selección de pieza usada es «primero la más rara»; pero se considera solo a los vecinos cercanos el 80% de las veces mientras que el 20% restante se considera solo a los vecinos lejanos.
- En Seok se dotó a los pares de un mecanismo para determinar si son pares sombreados utilizando datos del protocolo de encaminamiento (arquitectura de capa transversal). Un par sombreado determina si está encaminando piezas que aún no tiene para que las conserve.
- En el protocolo BitHoc10, en el algoritmo de selección de pares, la conexión optimista de las semillas se destina a los pares en el vecindario lejano (área de diversificación). Por otro lado, un par sanguijuela solo considera pares en el vecindario cercano (área de compartición).

- En Mobile-BitTorrent se limitó el alcance de comunicación de los nodos para establecer comunicación solo a un salto. Además, un par sanguijuela solicita las piezas empataadas en frecuencia en orden descendente, mientras que un par difusor, difunde las piezas solicitadas en orden ascendente.

4.3 Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño que se utilizaron para la evaluación de desempeño de las adaptaciones del protocolo BitTorrent en el entono MANET son:

- Proporción de descargas completas sobre tiempo de descarga. Se define como la cantidad de pares que obtienen una copia completa del contenido a partir de un periodo de descarga preestablecido. Dicho periodo es dividido en intervalos de veinticinco minutos para el muestreo del porcentaje de descargas exitosas total.
- Relación de equidad. Esta medida cuantifica la contribución de todos los pares con respecto al suministro del contenido medido en *bytes*, la cual se denota como F . Para una red de n pares compartiendo el mismo contenido y en donde x_i representa la cantidad total de *bytes* del contenido enviados por el par i , la razón de equidad se puede calcular mediante la siguiente fórmula [1]:

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (4.1)$$

- Razón de envío por pieza. Se define como el cociente del total de piezas P_{upload} enviadas por todos los pares en la red entre el total de piezas $P_{download}$ descargadas. Esta medida puede ser utilizada para determinar una proporción de piezas «excedentes» producidas por el envío exitoso de solo una de ellas. Con ello, intuitivamente podemos razonar sobre la sobrecarga en la red provocada por las adaptaciones del protocolo BitTorrent en aras de que todos los nodos terminen de descargar completamente el contenido. Esta cantidad la denotamos por R_{piece} y se define como:

$$R_{piece} = \frac{P_{upload}}{P_{download}}. \quad (4.2)$$

4.4 Configuración de las simulaciones

En este apartado se presenta la configuración de los escenarios de simulación para la evaluación de desempeño de las adaptaciones del protocolo BitTorrent al entorno MANET. Primero, definimos un área de simulación de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$, la cual podemos referir como la dimensión de un parque temático o un campus universitario hipotético. La cantidad de nodos presentes en esta área fue variando para cada prueba, la sucesión establecida fue de 25, 50, 75 y 100 nodos.

Los nodos se mueven y configuran conforme al modelo SLAW propuesto en [34]. A partir de esto, la velocidad de los nodos se toma de una distribución normal con media $\mu = 1.36\text{ m/s}$ y varianza $\sigma^2 = 0.0361\text{ m}^2/\text{s}^2$ [30], los tiempos de pausa son muestreados a partir de una distribución de Pareto truncada y el alcance de las áreas confinadas se establece en 40 m . También, el grado de autosimilitud de los puntos de recorrido se establece en 0.75 . Por otra parte y con la finalidad de recolectar datos significativos para realizar un adecuado análisis, en el diseño de los experimentos se considera un periodo de «calentamiento». Posterior a la fase de calentamiento, la etapa de descarga del contenido comienza con una cantidad variable de semillas para cada prueba, en las configuraciones de cada escenario se consideran 1, 5, y 10 semillas iniciales. Dichos proveedores principales se eligen en orden ascendente de acuerdo con el identificador del nodo en la red. La duración de la fase de calentamiento se fija en 72 horas y para la etapa de descarga se establece un límite de ocho horas para efectuar la descarga completa del contenido, ambos son tiempos de simulación. Cabe resaltar que en esta última etapa, todos los nodos en la red están interesados en el mismo contenido digital. Además, ninguno de ellos se retira del enjambre hasta que el periodo de descarga expira.

Para la etapa de descarga, cada nodo en la red integra el modelo EbitSim para representar la aplicación BitTorrent, o alguna de sus adaptaciones con la que cuentan los dispositivos móviles que son portados por las personas (nodos). Así, el tamaño del contenido a compartir se especifica en 10 Mbytes dividido en 40 piezas de igual tamaño. Dicho contenido representa abstractamente un archivo simple de audio, video, o imagen como los típicamente intercambiados en redes sociales y servicios de mensajería instantánea para teléfonos «inteligentes». Por otra parte, cada nodo es instrumentado con la representación de una tarjeta de interfaz de red inalámbrica que hace uso del protocolo 802.11g. El área de comunicación de cada nodo se establece en 50 m a la redonda. El parámetro para limitar el número de saltos (TTL, *time to live*) a través de los que será reenviada una

solicitud se configura en el protocolo BTM con un valor de 10. Para Mobile-BitTorrent se configura el TTL con un valor de uno. El resto de las adaptaciones y la versión original del protocolo utilizan el valor por defecto en el simulador INET versión 2.1.0 (TTL con un valor de 32). También, en el entorno de simulación se considera el modelo de propagación de dos rayos (*two-ray-ground model*) y el protocolo de encaminamiento definido para cada nodo fue DSR (*dynamic source routing*), debido a que genera poca sobrecarga de encaminamiento, sin comprometer la capacidad de reacción ante los cambios abruptos en la red [2]. Para resumir los ajustes descritos anteriormente, en la tabla IV.1 se presenta la configuración general de los escenarios de simulación.

Tabla IV.1: Configuración de los parámetros del escenario de simulación.

Parámetro	Configuración
Área de simulación	500 m × 500 m
Cantidad de nodos	25, 50, 75 y 100
Cantidad de semillas iniciales	1, 5 y 10
Periodo de calentamiento del modelo SLAW	72 h
Periodo de la fase de descarga	8 h
Velocidad de los nodos	Distribución $N(\mu = 1.36 \text{ m/s}, \sigma^2 = 0.0361 \text{ m}^2/\text{s}^2)$
Periodo de pausa de los nodos	Distribución de Pareto truncada, parámetro de forma $\alpha = 1.36$, rango mínimo de 30 s y máximo de 9054 s
Alcance de comunicación inalámbrica de los nodos	50 m
Alcance de las áreas confinadas	40 m
Tamaño del contenido	10 Mbytes
Protocolo de encaminamiento	DSR (<i>dynamic source routing</i>)
Modelo de propagación	Dos rayos (<i>two-ray-ground model</i>)
Grado de autosimilitud de los puntos de recorrido	$H = 0.75$

CAPÍTULO 5

Evaluación de desempeño: resultados y análisis

En esta sección se exponen y analizan los resultados de la evaluación de desempeño de las adaptaciones del protocolo BitTorrent al entorno MANET. El porcentaje de descargas completas con respecto a los intervalos de tiempo fijados se presenta en la sección 5.1. Después, el denominado coeficiente de equidad se expone en la sección 5.2 el cual, como su nombre lo indica, permite medir la disposición global de los pares para compartir el contenido. En la sección 5.3 se expone el excedente del contenido transmitido por cada protocolo medido en términos del tamaño de pieza.

Para cada experimento se hicieron 30 repeticiones independientes, cada valor en las gráficas corresponde al promedio de dichas ejecuciones.

5.1 Tiempo promedio de descargas exitosas sobre tiempo de descarga

En esta sección se presentan los resultados de cada protocolo con respecto al porcentaje de descargas completas. Aunque el tiempo para realizar la distribución del contenido es establecido en ocho horas, por conveniencia todas las gráficas se ajustaron a un periodo más corto, en el cual todos los pares interesados obtienen una copia completa del contenido, o en su defecto, el proceso de descarga no presenta más cambios durante el límite de tiempo preestablecido. Cabe destacar que el tiempo para realizar la descarga es dividido en intervalos de 25 minutos. Los valores promedio mostrados en las gráficas de esta sección incluyen intervalos con un nivel de confianza del 95%. El tratamiento estadístico de los resultados expuestos en este capítulo permiten la observación de ciertas tendencias que solo son válidas en el conjunto de experimentos planteados.

Comenzando con el protocolo BitTorrent clásico en las figuras 5.1(a-c) se puede observar el porcentaje de pares que obtienen una copia completa del contenido. Al hacer una medición en cada una de las ranuras de tiempo es posible apreciar el efecto que tienen las semillas en el desempeño

del protocolo. En pocas palabras, mientras más pares semillas existan al inicio de la compartición del contenido es más probable que los pares sanguijuela obtengan piezas del contenido en el menor tiempo posible. Sin embargo, la cantidad de pares que terminan la descarga completa del contenido no evoluciona después de un periodo relativamente corto. Esta tendencia se repite en los diferentes tamaños de red, y las razones por las cuales se presenta este comportamiento son las siguientes:

1. Básicamente el protocolo BitTorrent fue diseñado originalmente para redes cableadas donde no es relevante tomar en cuenta los cambios en la topología física de la red para realizar la distribución del contenido.
2. Aunado al punto anterior, la movilidad de los nodos provoca cambios en la topología de la red. Con lo cual la probabilidad de incurrir en retardos y pérdidas en la solicitud de piezas aumenta. Por ejemplo, en prolongadas rutas multisalto el desvanecimiento en los enlaces de comunicación degrada el funcionamiento del servicio de distribución del contenido.

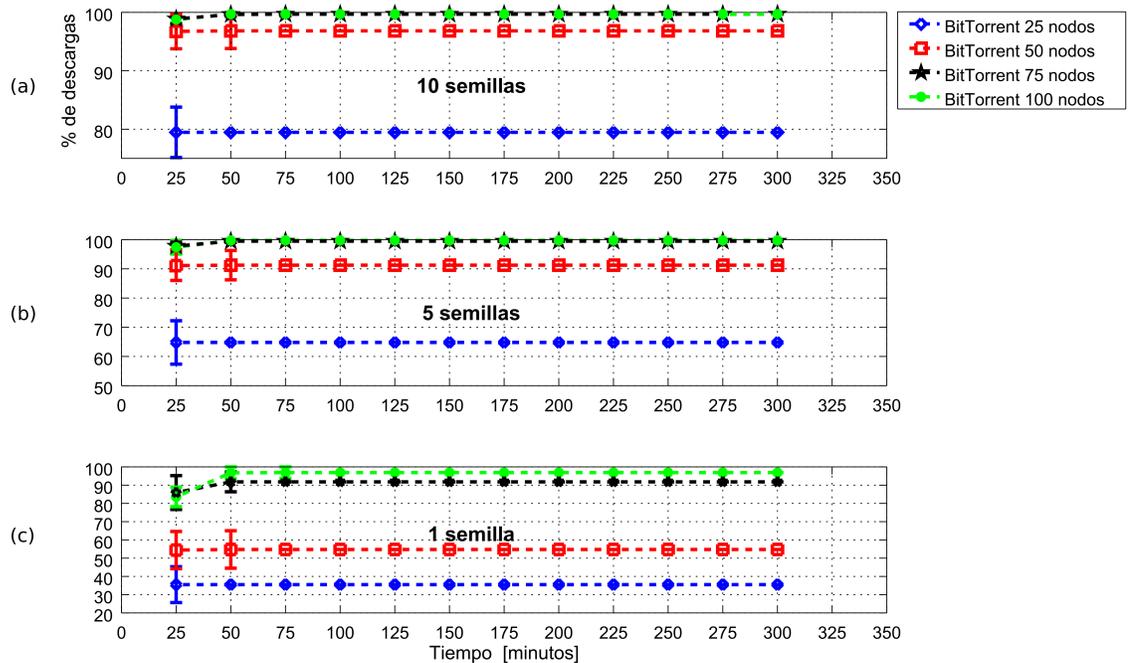


Figura 5.1: Porcentaje de descargas completas del protocolo BitTorrent.

El caso más representativo sobre las repercusiones de una selección del vecindario (subsección 2.2.2), independiente de la localización física de los nodos, se presenta con 25 nodos en las figuras 5.1(a-c). En estas podemos constatar que después de la primera ranura de tiempo, no existe un cambio en el conteo de pares que terminan la descarga completa, a pesar de la proliferación de semillas. Por ejemplo, en la figura 5.1(b) con 25 nodos y cinco semillas iniciales el promedio de porcentaje de descargas completas es de 65%. Esto significa que del total de pares sanguijuela iniciales solo 13 de ellos obtuvieron una copia completa del contenido y se convirtieron en semillas. En la medida que la densidad de nodos presentes en la red aumenta, la tendencia que se observa es que el porcentaje de pares que obtienen una copia completa del contenido también se incrementa. Esto significa que bajo el modelo de movilidad SLAW, mientras la densidad de nodos en la red sea bajo, las oportunidades de establecer enlaces de comunicación con los nodos vecinos disminuyen. Por el contrario, al aumentar la densidad de nodos es más probable encontrar más pares dentro de las áreas confinadas en las cuales están distribuidos los nodos.

En la figura 5.1(c) se expone el efecto de reducir a una semilla inicial la compartición del contenido bajo los diferentes tamaños de red. En la primera ranura de tiempo se observa que el mejor porcentaje de descargas completas se obtiene con 75 nodos. Después de 50 minutos, el escenario con 100 nodos mantiene el porcentaje más alto de descargas completas. Este cambio se puede atribuir al cuello de botella que se origina por el procesamiento de peticiones del contenido en la semilla inicial. En particular, en una red con 100 nodos, el número de pares sanguijuela que en principio logran obtener piezas del contenido a partir de la semilla inicial es más reducido que en una red con menor cantidad de nodos. Sobretudo si consideramos que al aumentar la densidad de nodos en la red es más probable encontrar más participantes en la descarga dentro de las áreas confinadas en las cuales están distribuidos los nodos. Una vez que las piezas del contenido comienzan a ser distribuidas por los pares sanguijuela, las capacidades del sistema se incrementan y con ello la posibilidad de obtener piezas del contenido en menores tiempos. Este cambio no se observa en las figuras 5.1(a-b) en donde los experimentos con 75 y 100 nodos prácticamente obtienen los mismos resultados.

Es necesario resaltar que aún en los tamaños de red más densos en las figuras 5.1(a-b), no se concreta la descarga completa en todos los nodos. Con ello se resaltan las observaciones expuestas en [7, 14] en donde se argumenta que los protocolos diseñados para redes cableadas (en este caso BitTorrent) no son aptos para ser ejecutados de manera simple en el entorno MANET. Cuando el

ajuste de la topología de la red lógica P2P y la red física coinciden tanto como sea posible, es más probable que los enlaces de comunicación lógicos entre los nodos se puedan establecer siguiendo la ruta física óptima. Esto es conveniente, por ejemplo, en el reenvío de paquetes sobre rutas multisalto.

Continuando con el protocolo BTM en las figuras 5.2(a-c) es posible observar cómo todos los pares sanguínea obtienen una copia del contenido completo. Debido a que en esta propuesta se utiliza una arquitectura de capa transversal, la cantidad máxima de saltos permitidos en la red para la conformación del vecindario se establece en diez. Con ello originalmente se pretendía aumentar la conectividad de la red (en asociación con un rango de transmisión inalámbrico muy grande asignado a cada nodo). Esta configuración bajo el modelo SLAW permite crear rutas multisalto con un tiempo de vida suficiente como para concretar el intercambio de piezas en la capa BitTorrent. En las gráficas expuestas es notorio el beneficio de controlar la longitud de las rutas siempre y cuando los cambios en la topología de la red no sean tan abruptos.

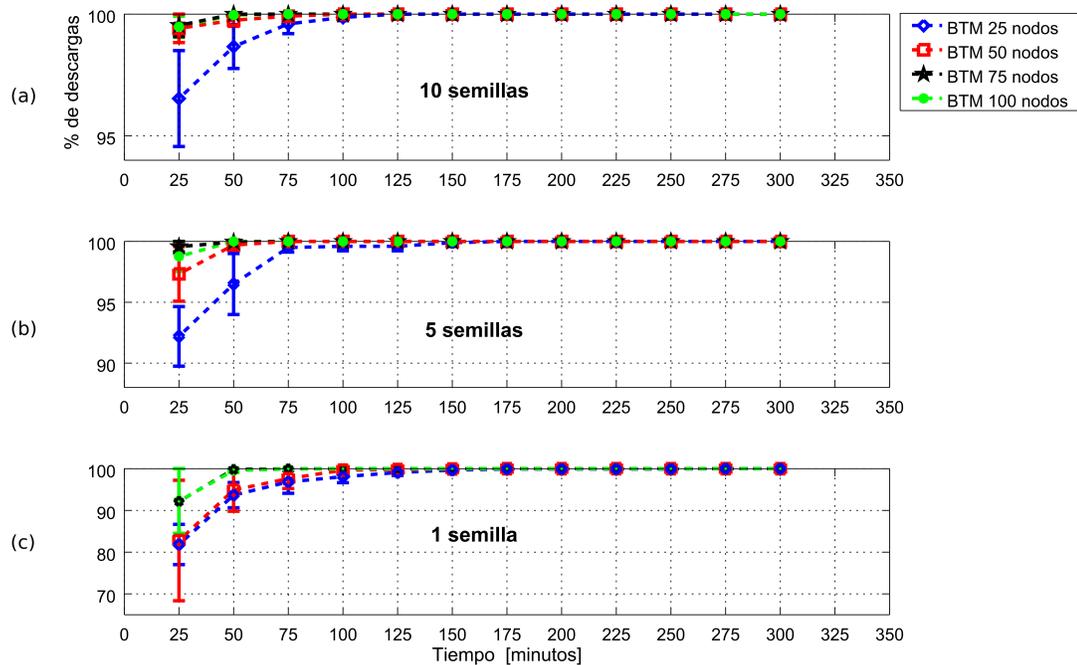


Figura 5.2: Porcentaje de descargas completas del protocolo BTM.

En la figura 5.2(c) se puede observar que aún con 25 nodos y una semilla inicial, el arranque de

la descarga durante la primera ranura de tiempo es relativamente rápido. Además, en las gráficas presentadas en 5.2(a-c) con 100 nodos, en la mayoría de los escenarios planteados, el porcentaje de descargas completas alcanza su máximo en un tiempo más corto en comparación con los escenarios de 25, 50 y 75 nodos. Se observa entonces, que la cantidad de nodos en cada escenario afecta el tiempo que tardan los n pares en obtener una copia completa del contenido. Puesto que al aglomerar más pares sanguijuela en el enjambre la demanda del contenido se intensifica, de igual modo se incrementa la capacidad general del sistema al contar con más pares que operan como distribuidores y consumidores del contenido. Por otra parte, en la figura 5.2(b) se alcanza a distinguir que la red de 75 nodos supera ligeramente el porcentaje de descargas completas registrado en los otros tamaños de red. Suponemos las siguientes dos razones para explicar este caso. La primera es que para tamaños de red más pequeños la falta de conectividad afecta negativamente el tiempo en el que se distribuye el contenido, mientras que para tamaños mayores la competencia por el medio tiene un efecto similar. La segunda es observar que las semillas iniciales se encargan de proveer piezas en la región de la red en la que se encuentran. Por ello, la distribución del contenido se restringe temporalmente a ciertos sectores de la red. Después de cierto tiempo, las oportunidades de intercambio de piezas con los nodos que al inicio de la fase de descarga se encontraban más alejados de los proveedores iniciales aumentarán debido a la movilidad de los nodos. Ante una mayor densidad de nodos es más probable que se atienda a los pares más cercanos ralentizando así la adquisición de piezas por parte de los pares más remotos.

En las figuras 5.3(a-c) se observan los resultados obtenidos por el protocolo BitHoc08 con respecto al porcentaje de pares que logran obtener una copia completa del contenido. En estos resultados se observa una disminución del tiempo de descarga ante el incremento de semillas iniciales. Prácticamente a los 75 minutos más del 96% de los pares en la red terminan la descarga completa del contenido. Con ellos la idea de limitar el alcance del vecindario cobra más relevancia pues los cambios en la topología de la red son considerados mediante la arquitectura de capa transversal que se utilizó en esta propuesta. Asimismo, el incremento de los nodos en las zonas de popularidad permite una mayor conectividad entre ellos. En el caso de las particiones en la red, la movilidad de los nodos eventualmente propiciará las oportunidades para establecer comunicación entre áreas aisladas debido a que existe una gran probabilidad de que algunos nodos transiten entre varias zonas populares.

En esta propuesta la estrategia de selección de pieza ausente mejora las oportunidades de

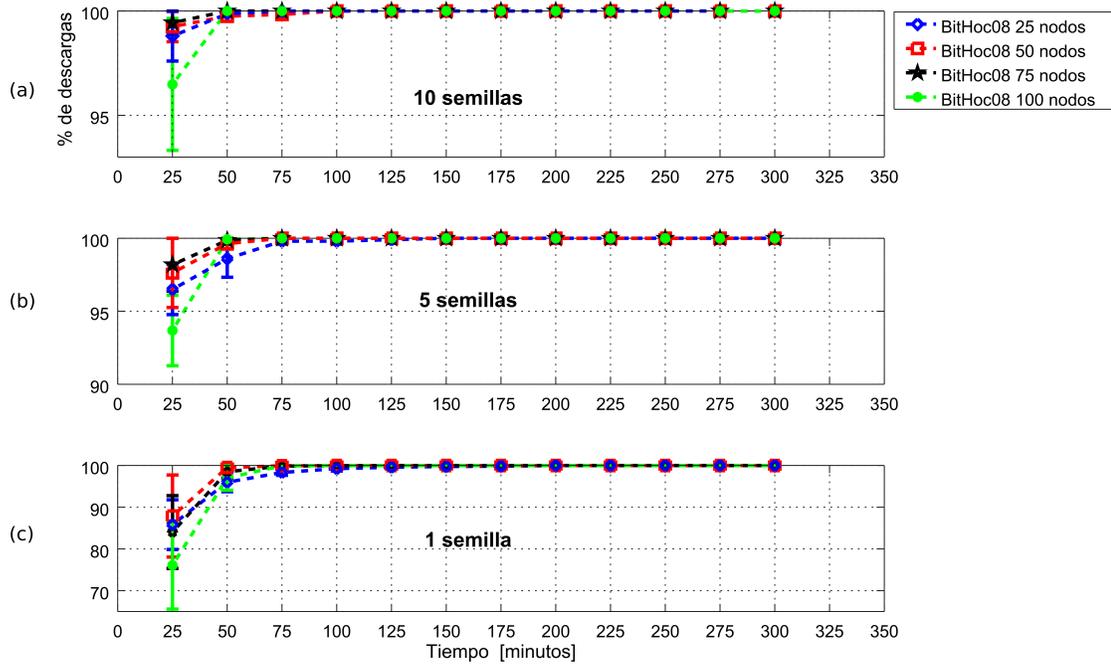


Figura 5.3: Porcentaje de descargas completas del protocolo BitHoc08.

compartición del contenido, pero debido al tiempo requerido para crear rutas multisalto con los pares lejanos y al breve tiempo de vida de estas rutas, se penaliza el tiempo de distribución.

En el protocolo Seok el porcentaje de pares que terminan la descarga completa se puede observar en las figuras 5.4(a-c). La escalabilidad en esta propuesta con respecto a la cantidad de semillas iniciales se puede apreciar en los diferentes tamaños de red. Particularmente, en los escenarios con 100 nodos la cantidad de pares que terminan la descarga completa tiende a crecer más rápido en comparación con los escenarios menos densos. Además, la ubicación de los denominados «pares sombreados» mediante el diseño de una arquitectura de capa transversal fomenta una disminución del tiempo de descarga que se puede apreciar con el incremento de nodos en la red. Con los datos recolectados por el protocolo de encaminamiento es posible anticipar regiones congestionadas en la red; de esta forma el tiempo de distribución se puede mejorar al evitar estas zonas y por ello aumentar la probabilidad de concretar la transferencia de piezas en menores tiempos. Este método de detección de pares sombreados parece funcionar bien con la movilidad de los nodos y de esta

manera, evitar envíos redundantes de una misma pieza.

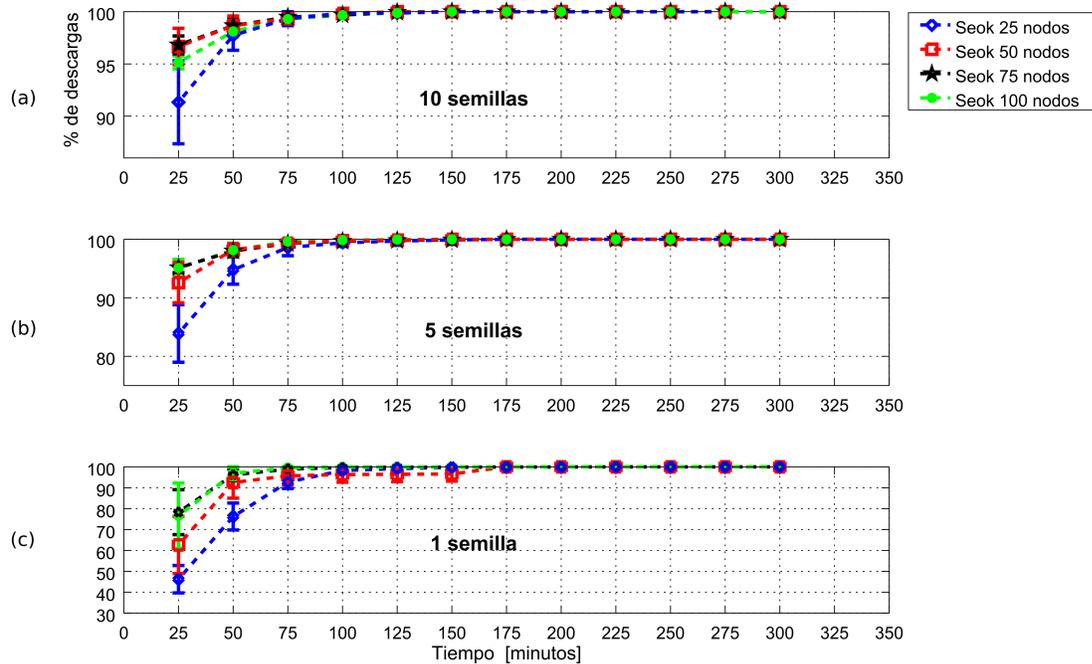


Figura 5.4: Porcentaje de descargas completas del protocolo Seok.

En las figuras 5.5(a-c) se puede observar el tiempo de distribución y el porcentaje de descargas completas obtenidas de los experimentos del protocolo BitHoc10. La tendencia en todos los tamaños de red es que con un incremento de la cantidad de nodos sin importar la cantidad de semillas iniciales las descargas completas aumentan. Parece que el esfuerzo de asignar solo a las semillas la tarea de distribuir el contenido a más de una cantidad finita de saltos en la red beneficia la tarea de terminar la descarga completa en menores tiempos.

En las figuras 5.6(a-c) se presentan los porcentajes de descargas completas de la propuesta Mobile-BitTorrent. En estas gráficas se puede observar un arranque relativamente lento en la distribución del contenido. Sin embargo, en todos los experimentos se alcanza el objetivo de obtener una copia completa del contenido para todos los pares sanguínea. En esta adaptación el porcentaje de descargas completas registrado durante la primera ranura de tiempo es menor en comparación con las adaptaciones anteriores. Esto resalta el efecto que tiene el realizar la distribución del contenido

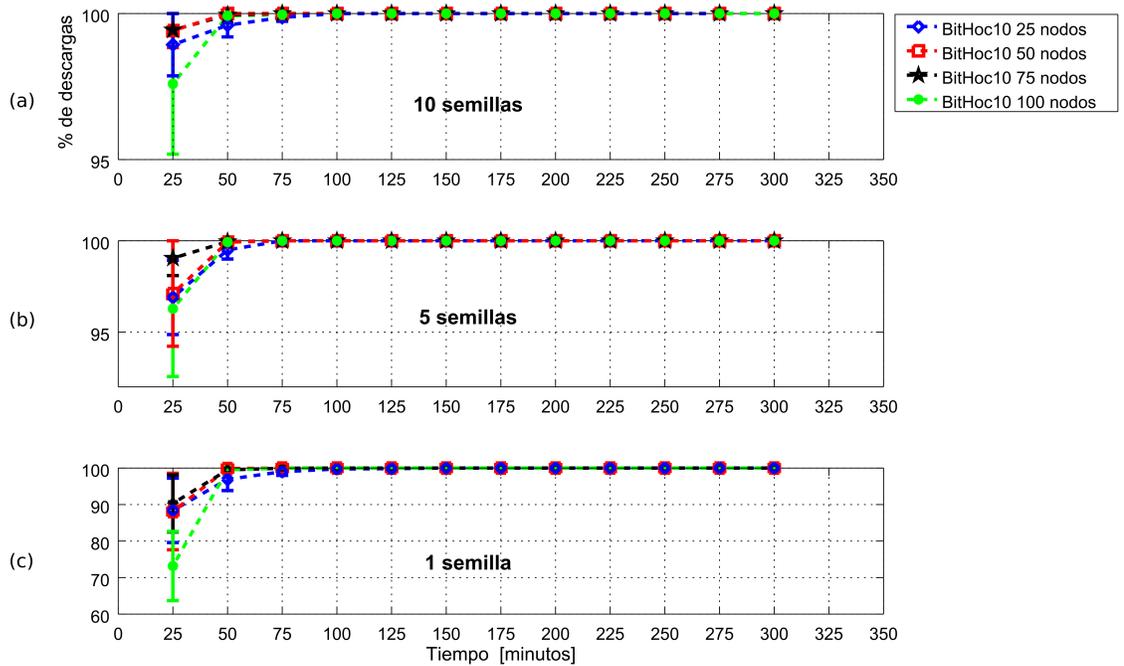


Figura 5.5: Porcentaje de descargas completas del protocolo BitHoc10.

sin la creación de rutas multisalto entre los nodos vecinos. Por otra parte, con un mayor número de pares en la red, las oportunidades de compartición del contenido aumentan. Una vez más, el incremento de nodos en las áreas de popularidad incide en las oportunidades de compartición del contenido.

5.2 Equidad en la distribución del contenido

En esta sección las propuestas son evaluadas de acuerdo con su grado de equidad en la distribución del contenido. De manera general, el coeficiente de equidad indica qué tan justa es la distribución del contenido medido en *bytes*. Lo ideal es que todos los pares distribuyan la misma cantidad del contenido. Sin embargo, como se puede apreciar en las figuras 5.7(a-d), esto no ocurre así y el desarrollo de incentivos que motiven la participación de todos los pares en la distribución del contenido es un reto interesante.

En la figura 5.7(a) se muestra el coeficiente de equidad para una red de 25 nodos; el efecto

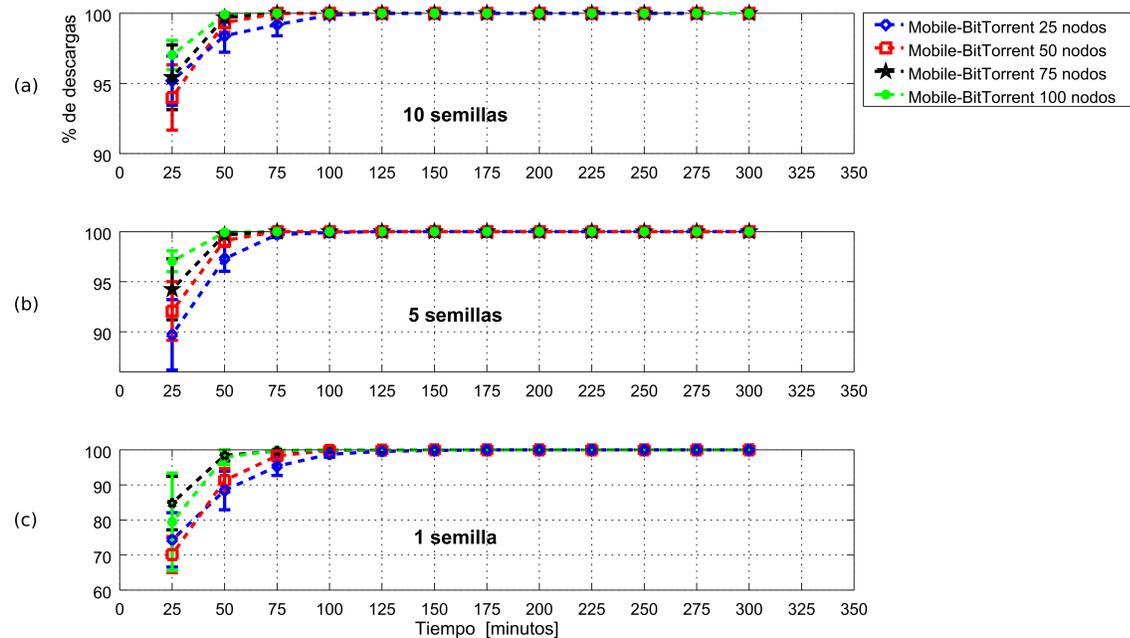


Figura 5.6: Porcentaje de descargas completas del protocolo Mobile-BitTorrent.

que tienen las semillas iniciales (1, 5 y 10) es positivo en la mayoría de los protocolos. De manera inesperada con el protocolo Mobile-BitTorrent esto no es así en los casos con 25, 75 y 100 nodos 5.7(a,c,d). Una posibles explicación a este fenómeno es que el protocolo utiliza la difusión a un salto para propagar los bloques del contenido, en consecuencia, los nodos a un salto de la semillas iniciales ven aumentada su carga de trabajo degradando el coeficiente de equidad. Al inicio de la fase de descarga los nodos más alejados de los proveedores iniciales no pueden participar en la distribución del contenido. De hecho, con una baja densidad de nodos es posible que existan partes en la red aisladas de los nodos proveedores. Después de un tiempo y debido a la movilidad de los nodos, es posible que algunos nodos en las zonas originalmente aisladas ya posean contenido para compartir y los pares más cercanos a las semillas iniciales contarán con una copia completa. Notemos entonces que un nodo tiene que esperar a que la ola de propagación de contenido le llegue para poder contribuir. En el caso particular de los nodos en la periferia, cuando por fin esto sucede, probablemente ya no haya trabajo por hacer y en consecuencia no contribuyen.

En las figuras 5.7(a-d), también se resalta la importancia de la estrategia del ojo por ojo

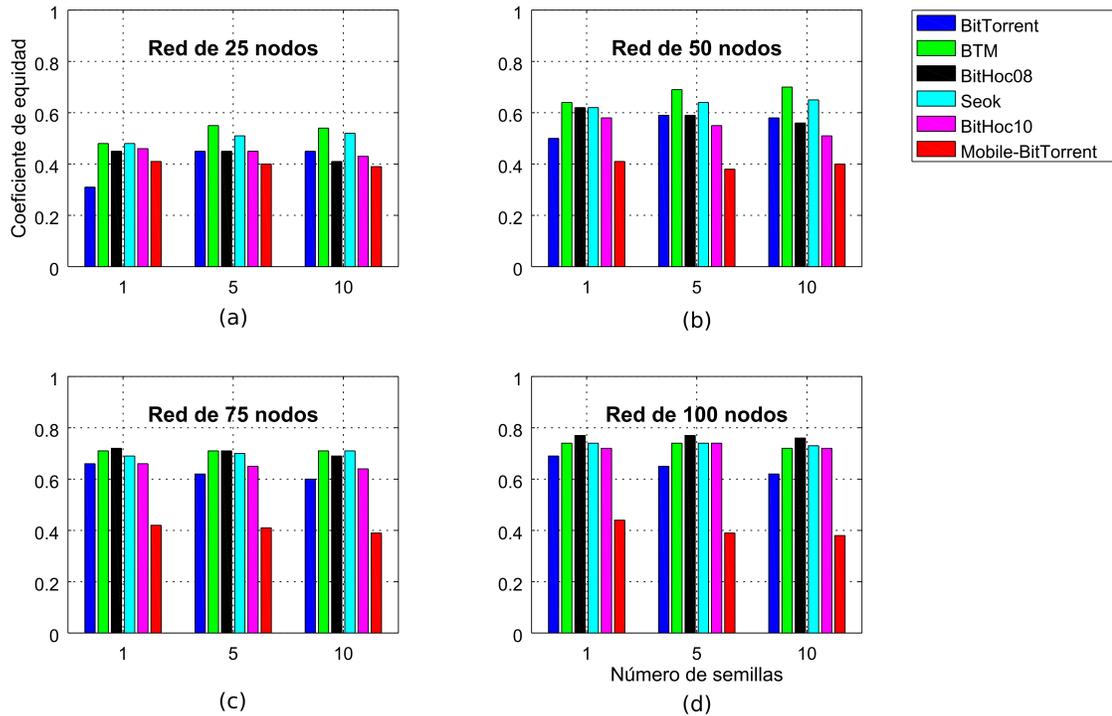


Figura 5.7: Comparación del coeficiente de equidad entre protocolos.

planteada en la creación del protocolo BitTorrent original. Sin esta estrategia, y aunque el resto de las características del protocolo fueran las mismas, es posible que BitTorrent no tendría el mismo éxito con el que cuenta actualmente, ya que la mayor parte de los pares habrían pretendido aprovecharse de los demás [20].

5.3 Sobrecarga

En esta sección presentamos los resultados del excedente del contenido transmitido en términos del tamaño de pieza. En otras palabras, a cuántas piezas equivale el envío exitoso de una sola de ellas. De este modo, en las figuras 5.8(a-d) se observa que ninguna de las adaptaciones del protocolo BitTorrent requiere más del equivalente a 1.2 piezas para lograr concretar un envío exitoso.

Considerando que la retransmisión de una pieza a nivel de la capa BitTorrent puede ocurrir por

invalidez de la ruta. Podemos atribuir los buenos resultados a que, con alta probabilidad, las rutas se mantienen un tiempo suficiente para que la transmisión se complete con éxito desde el primer intento. Este resultado es coherente con lo reportado en [33].

En cada adaptación del protocolo BitTorrent la razón de envío por pieza se mantiene constante ante los escenarios de movilidad planteados. En general las propuestas son bastante exitosas al momento de evitar sobrecargar la red con el envío de contenido excedente. Solamente, en este apartado se destaca al protocolo original BitTorrent, el cual tiene la peor evaluación con respecto al envío de contenido excedente en la figura 5.8(b) bajo una configuración de 50 nodos y una semilla inicial. Otra tendencia que se puede apreciar en esta figura es que, ante el incremento de nodos en la red, la transmisión de contenido excedente disminuye incluso en la versión del protocolo BitTorrent original (exceptuando el escenario anteriormente mencionado).

Si se descarta el protocolo BitTorrent original en las figuras 5.8(a-d). Los resultados indican que la sobrecarga provocada en la red por la transmisión redundante de datos del contenido es despreciable. Sin embargo, es necesario recalcar que esto solo es a nivel de la capa de aplicación, siendo que el término sobrecarga puede ser comúnmente asociado en varios niveles de la pila de protocolos.

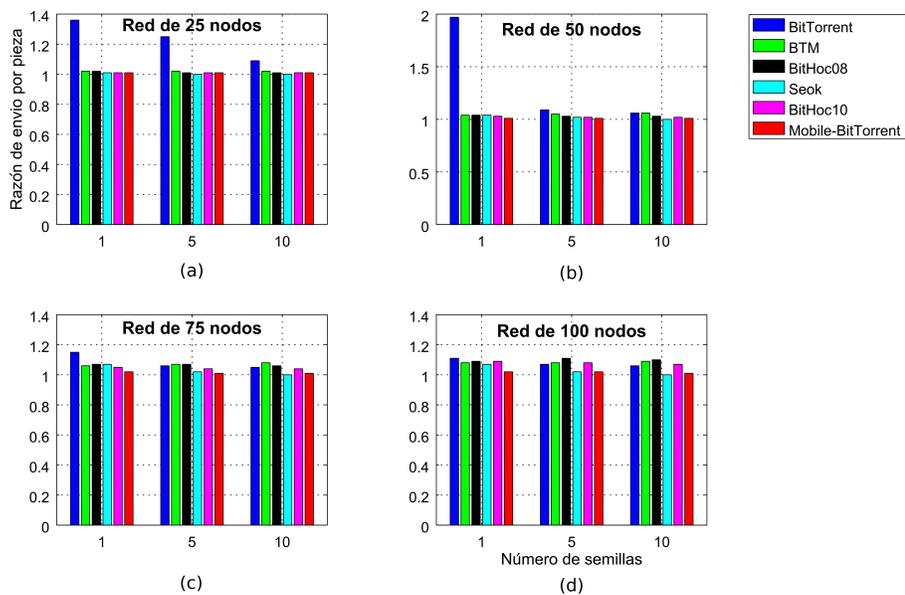


Figura 5.8: Comparación entre protocolos por el excedente de piezas transmitidas.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y perspectivas

En este proyecto de investigación se analizaron las propuestas reportadas en el estado del conocimiento para adaptar el protocolo BitTorrent al entorno MANET. La adaptación de este protocolo en el entorno MANET incorpora nuevos retos como son: incremento del costo de encaminamiento de los paquetes y disminución de la disponibilidad de la red debido a las particiones de la misma. Lo anterior origina que los tiempos de descarga aumenten, el porcentaje de descargas completas disminuya y la equidad de intercambio se reduzca.

En primera instancia, se catalogó cada una de las propuestas de acuerdo a su diseño arquitectural y a sus estrategias, tanto para la elección de pares a desahogar como para la selección de pieza. Observamos también que en la validación de las propuestas estudiadas, cuando se consideró la movilidad peatonal, se utilizó el modelo *random waypoint*.

Posteriormente, se diseñó un marco de evaluación uniforme que considera el modelo de movilidad SLAW, el cual incluye las propiedades del movimiento humano mencionadas anteriormente (sección 4.1). Los resultados de la evaluación ratifican que los nodos tienden a frecuentar áreas populares en la red. Esta característica junto con el incremento de los nodos interesados en la compartición del contenido aumenta la probabilidad de mejorar el nivel de conectividad. En consecuencia y constatándolo con los resultados obtenidos, el porcentaje de descargas completas presenta un crecimiento favorable en todas las pruebas realizadas. Más aún, si consideramos un incremento en las semillas iniciales es posible apreciar la escalabilidad de las adaptaciones del protocolo, desde el punto de vista del tiempo de distribución. Por supuesto, las bondades de las estrategias establecidas por cada protocolo se ven beneficiadas por el hecho de que las personas (nodos) restringen sus desplazamientos apegándose a un plan de viaje, en donde el propósito principal es reducir la distancia que se va a recorrer. De esta manera, es posible observar que los tiempos de vida de los enlaces lógicos son lo suficientemente largos como para realizar una distribución del contenido efectiva.

El protocolo BitTorrent original esencialmente se enfoca en reducir el tiempo de descarga,

porcentaje de descargas completas y la equidad de intercambio. Sin embargo, al migrar este protocolo a un entorno MANET, las estrategias utilizadas ya no garantizan buenos resultados.

En el entorno MANET, limitar el alcance del vecindario mejoró el porcentaje de descargas completas, pero afectó el coeficiente de equidad pues el contenido se propaga a partir de la(s) semilla(s) inicial(es).

Mobile-BitTorrent es el protocolo que mantiene un envío de contenido excedente mínimo en los diferentes tamaños de red. Sin embargo, el coeficiente de equidad para esta propuesta es el más bajo. En primera instancia, al acotar la comunicación entre los pares vecinos se promueve una baja sobrecarga en la red. Sin embargo, la distribución se realiza sin reciprocidad por parte de los nodos que consumen el contenido.

La estrategia de selección aleatoria parece superar a la estrategia de selección de pieza rara, en el sentido de mejorar el tiempo de distribución del contenido. El porcentaje de descargas completas es alcanzado en todas las adaptaciones del protocolo BitTorrent siendo la arquitectura de capa transversal la propuesta que mejora el tiempo de distribución en comparación con las propuestas que utilizan la tradicional pila de protocolos (en este caso BitTorrent y Mobile-BitTorrent).

Desde la perspectiva de sobrecarga a nivel de la capa BitTorrent, las mediciones del excedente del contenido intercambiado confirman que las adaptaciones del protocolo BitTorrent no sobrecargan la red de manera excesiva, puesto que la razón de envío del contenido redundante es mínima. Esta última observación refleja que al considerar la movilidad humana en el entorno MANET los cambios en la topología no son tan extremos, como se anticipó en la evaluación de la mayoría de las adaptaciones del protocolo BitTorrent.

Finalmente, los resultados obtenidos en este proyecto de investigación podrían ser útiles para establecer los principios en la consolidación de una nueva propuesta. En dicho esfuerzo, quizás se consideraría integrar alguna de las estrategias exitosas identificadas en este trabajo. De cualquier forma y bajo el mismo enfoque se puede afirmar que el éxito de la distribución de contenidos P2P en el entorno MANET dependerá del diseño de nuevas estrategias que consideren las características estadísticas del movimiento humano.

Referencias

- [1] R. Jain. *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. Wiley, 1991. ISBN: 9780471503361.
- [2] David B. Johnson, David A. Maltz y Josh Broch. «Ad Hoc Networking». En: Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001. Capítulo DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks, páginas 139-172. ISBN: 0-201-30976-9.
- [3] William Stallings. *Comunicaciones y redes de computadores, sexta edición*. Prentice Hall, 2001.
- [4] Bram Cohen. *Incentives Build Robustness in BitTorrent*. Enero de 2003.
- [5] Andrew S. Tanenbaum. *Redes de computadoras*. Pearson Educación, 2003.
- [6] Arnaud Legout, G. Urvoy-Keller y P. Michiardi. «Rarest First and Choke Algorithms Are Enough». En: *Proceedings of the 6th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*. IMC '06. Rio de Janeiro, Brazil: ACM, 2006, páginas 203-216. ISBN: 1-59593-561-4.
- [7] S. Rajagopalan y C. C. Shen. «A Cross-layer Decentralized BitTorrent for Mobile Ad hoc Networks». En: *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services*. Julio de 2006, páginas 1-10.
- [8] M. Conti y S. Giordano. «Multihop Ad Hoc Networking: The Reality». En: *IEEE Communications Magazine* 45.4 (abril de 2007), páginas 88-95. ISSN: 0163-6804.
- [9] M. Conti y S. Giordano. «Multihop Ad Hoc Networking: The Theory». En: *IEEE Communications Magazine* 45.4 (abril de 2007), páginas 78-86. ISSN: 0163-6804.
- [10] Marta C. González, Cesar A. Hidalgo y Albert-Laszlo Barabasi. «Understanding individual human mobility patterns». En: *Nature* (junio de 2008), páginas 779-782.

- [11] U. Lee y col. «Efficient peer-to-peer file sharing using network coding in MANET». En: *Journal of Communications and Networks* 10.4 (diciembre de 2008), páginas 422-429. ISSN: 1229-2370. DOI: 10.1109/JCN.2008.6389858.
- [12] Mohamed Karim Sbai y col. «Adapting BitTorrent to Wireless Ad Hoc Networks». En: *Proceedings of the 7th International Conference on Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks. ADHOC-NOW '08*. Sophia-Antipolis, France: Springer-Verlag, 2008, páginas 189-203. ISBN: 978-3-540-85208-7.
- [13] Heather Yu Buford John y Eng Keong Lua. *P2P networking and applications*. Morgan Kaufmann, 2009.
- [14] N. Gaddam y A. Potluri. «Study of BitTorrent for file sharing in ad hoc networks». En: *2009 Fifth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks (WCNS)*. Diciembre de 2009, páginas 1-6.
- [15] S. K. Ko e Y. H. Kim. «Network-Aware P2P Content Sharing over MANET». En: *2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*. Mayo de 2009, páginas 661-665.
- [16] Amir Krifa y col. «A Standalone Content Sharing Application for Spontaneous Communities of Mobile Handhelds». En: *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Networking, Systems, and Applications for Mobile Handhelds*. MobiHeld '09. Barcelona, Spain: ACM, 2009, páginas 77-78. ISBN: 978-1-60558-444-7.
- [17] K. Lee y col. «SLAW: A New Mobility Model for Human Walks». En: *IEEE INFOCOM 2009*. Abril de 2009, páginas 855-863.
- [18] Mohamed Karim Sbai, Emna Salhi y Chadi Barakat. «A Membership Management Protocol for Mobile P2P Networks». En: *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Technology, Application & Systems. Mobility '09*. Nice, France: ACM, 2009, 54:1-54:8. ISBN: 978-1-60558-536-9.
- [19] T. Karagiannis, J. Y. Le Boudec y M. Vojnovic. «Power Law and Exponential Decay of Intercontact Times between Mobile Devices». En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 9.10 (octubre de 2010), páginas 1377-1390. ISSN: 1536-1233.

- [20] J. F. Kurose y K. W. Ross. *Redes de computadoras: un enfoque descendente*. Pearson Educación, 2010.
- [21] M. K. Sbai, E. Salhi y C. Barakat. «P2P content sharing in spontaneous multi-hop wireless networks». En: *2010 Second International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS (COMSNETS 2010)*. Enero de 2010, páginas 1-10.
- [22] Mohamed Karim Sbai. «Architecture for content sharing in wireless networks». Tesis doctoral. University of Nice - Sophia Antipolis, octubre de 2010.
- [23] P. Evangelista y col. «EbitSim: An Enhanced BitTorrent Simulation Using OMNeT++ 4». En: *2011 IEEE 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Julio de 2011, páginas 437-440.
- [24] Yaozhou Ma. y Abbas Jamalipour. «Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks: From Routing to Content Distribution». En: *Springer Science and Business Media* (2011).
- [25] N. C. Quental y P. A. da S. Gonçalves. «Exploiting application-layer strategies for improving BitTorrent performance over MANETs». En: *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. Enero de 2011, páginas 691-692.
- [26] I. Rhee y col. «On the Levy-Walk Nature of Human Mobility». En: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 19.3 (junio de 2011), páginas 630-643. ISSN: 1063-6692.
- [27] K. Lee y col. «SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk». En: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 20.2 (abril de 2012), páginas 515-529. ISSN: 1063-6692.
- [28] Paolo Santi. *Mobility Models for Next Generation Wireless Networks: Ad Hoc, Vehicular and Mesh Networks*. Wiley, 2012. ISBN: 9781119992011.
- [29] Stefano Basagni y col. *Mobile Ad Hoc networking: the cutting edge directions*. Volumen 35. John Wiley & Sons, 2013.
- [30] Satish Chandra y Anish Kumar Bharti. «Speed distribution curves for pedestrians during walking and crossing». En: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* (2013).
- [31] NGN. *Identification and Management of Distributed Data*. CRC Press, 2013.
- [32] N. Belblidia y col. «EPICS: Fair Opportunistic Multi-Content Dissemination». En: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 14.9 (septiembre de 2015), páginas 1847-1860. ISSN: 1536-1233.

- [33] Adán G. Medrano-Chávez, Elizabeth Pérez-Cortés y Miguel Lopez-Guerrero. «Studying the Effect of Human Mobility on MANET Topology and Routing: Friend or Foe?» En: *Proceedings of the 13th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*. MobiWac '15. Cancún, México: ACM, 2015, páginas 39-46. ISBN: 978-1-4503-3758-8.
- [34] Adán Geovanni Medrano Chávez. «Características estadísticas de la topología de las redes ad hoc móviles y evaluación de estrategias para mantener redes lógicas». Tesis doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa, marzo de 2016.
- [35] BitTorrent. *Britannica Academic, Encyclopædia Britannica, 6 junio 2012*. Consultado: 20 de noviembre de 2017. URL: <https://goo.gl/VsSSWo>.
- [36] IETF. *Mobile Ad-hoc Networks (MANET)*. Internet Engineering Task Force. URL: <https://goo.gl/kXniN7>.
- [37] *INET framework*. Consultado: 24 de octubre de 2017. URL: <https://inet.omnetpp.org/>.
- [38] *OMNeT++ simulator*. Consultado: 24 de octubre de 2017. URL: <https://omnetpp.org/>.
- [39] P2P. *Britannica Academic, Encyclopædia Britannica, 19 febrero 2009*. Consultado: 28 de noviembre de 2017. URL: <https://goo.gl/0ziyYj>.
- [40] *The BitTorrent Protocol Specification*. <https://goo.gl/bSe5e>. Consultado: 3 de marzo de 2017.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00070

Matrícula: 2153805382

Distribución de contenidos en redes MANET utilizando el paradigma P2P

En la Ciudad de México, se presentaron a las 9:00 horas del día 26 del mes de enero del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. JAVIER GOMEZ CASTELLANOS
DR. ADAN GEOVANNI MEDRANO CHAVEZ
DR. MICHAEL PASCOE CHALKE
DRA. ELIZABETH PEREZ CORTES

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (CIENCIAS Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION)

DE: EDUARDO ANDRES MARCELO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



EDUARDO ANDRES MARCELO
ALUMNO

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTE

DR. JAVIER GOMEZ CASTELLANOS

VOCAL

DR. ADAN GEOVANNI MEDRANO CHAVEZ

VOCAL

DR. MICHAEL PASCOE CHALKE

SECRETARIA

DRA. ELIZABETH PEREZ CORTES