

**Análisis de latencia de handover
en WLANs para aplicaciones
en tiempo real**

Idónea Comunicación de Resultados
para obtener el grado de:
MAESTRA EN CIENCIAS Y
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
presentada por
Azalia Patiño Castillo

Asesor:
Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa frente al jurado integrado por:

Dr. Enrique Stevens Navarro - Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos - Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina - Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

9 de enero de 2014

Agradecimientos

A mis padres, por apoyarme siempre en todas las circunstancias de mi vida.

A mis hermanos por estar conmigo.

A mi asesor el Dr. Víctor Manuel Ramos, por guiarme y apoyarme en mi vida académica y personal.

A todos mis amigos y mi pareja por su apoyo y compañía.

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de los efectos que causa la latencia de handover en redes inalámbricas de área local, mejor conocidas como WLAN por sus siglas en inglés de *Wireless Local Area Network*. Este tipo de redes constituye una importante alternativa para satisfacer la demanda cada vez mayor de los usuarios en el mundo de las telecomunicaciones. Una de las aplicaciones más populares es la transmisión de contenido multimedia entre los usuarios de las redes inalámbricas.

Las aplicaciones multimedia exigen un nivel de recursos de red mayor que el de muchas de las aplicaciones, por lo cual, se debe reducir al máximo el tiempo que tarda un nodo móvil en cambiar de punto de acceso debido a su trayectoria en movimiento, es decir, disminuir la latencia ocasionada por un evento de handover, con la finalidad de que la aplicación en curso no sea interrumpida o sea de baja calidad. En este trabajo, estudiamos los efectos que causa el tiempo de handover cuando se transmiten flujos de video en formato MPEG4 de un nodo móvil a otro dentro de una WLAN. Para ello, planteamos distintos escenarios que conforman un ambiente diverso, con el fin de evaluar los algoritmos de handover que actualmente se utilizan en una WLAN regida bajo la tecnología del estándar IEEE 802.11.

Nos enfocamos en la comparación de desempeño del protocolo de handover en 802.11, y en la inclusión de patrones de movilidad en los nodos, para lograr estudiar los eventos de traspaso de red, realizando primeramente una investigación del comportamiento de los algoritmos actuales de handover. En este estudio, también realizamos una propuesta de extensión al protocolo de traspaso de red en redes inalámbricas de área local, para reducir los tiempos de latencia de handover.

Durante el desarrollo de este trabajo, presentamos también un conjunto de herramientas para la evaluación de este tipo de escenarios dentro de un ambiente de simulación computacional. Evaluamos los escenarios tanto en presencia de tráfico multimedia y diferente al multimedia también, con distintos patrones de movilidad en los nodos, variando la cantidad tanto de nodos móviles, como del tráfico que se transmite durante la simulación.

Abstract

In this master project is studied the handover latency effects in IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks (WLANs). This type of network is an alternative to satisfy the increasingly connectivity demand from the telecommunication users around the world. One of the most popular applications in such universe, is the multimedia content transmission between wireless networks users.

Multimedia applications demand a higher network resources level than other applications. For this reason, the time a mobile takes to shift from one access point to another due to its mobility must be minimized, i.e., handover latency has to be reduced to avoid current applications being interrupted or quality decreased.

In this work, we study the effects caused by handover latency when MPEG4 video traffic is being transmitted between a mobile node to another in the same WLAN. For this purpose, in this work it is defined multiple scenarios conforming an assorted environment, in order to evaluate the current handover latency algorithm used by a WLAN network working under IEEE 802.11 standard. We focus on the 802.11 handover protocol for performance comparison and the inclusion of mobility patterns for nodes to achieve the handover analysis. In addition, an extensive state of the art of handover techniques is presented. It is also proposed an extension for the WLAN network handover protocol in order to obtain lower handover latency.

In this work, it is included a set of tools to evaluate different scenarios. In the design of the simulation scenarios, we consider aspects like no presence of multimedia data traffic and various node mobility patterns, varying the number of nodes and the level of data traffic during the simulation.

Acrónimos

AP	Access Point
WLAN	Wireless Local Area Network
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
ACK	Acknowledgement
AUTH	Authentication
UDP	User Data Protocol
BCN	Beacon Frame
IP	Internet Protocol
TCP	Transport Control Protocol
MAC	Medium Access Control
VoIP	Voice Over IP
NIC	Network Interface Card
HO	Handoff
RTCP	Real Time Control Protocol
RTP	Real Time Protocol
FTP	File Transfer Protocol
GoB	Group of Blocks
GoP	Group of Pictures
VoD	Video on Demand
QoS	Quality of Service
NM	Nodo móvil
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
OSI	Open Systems Interconnection model

Contenido

Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Contexto y problemática	2
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos particulares	5
2. Trabajo relacionado	7
2.1. Latencia de handover	7
3. Handover horizontal en redes WLAN	9
3.1. Toma de decisión en el proceso de handover	11
3.1.1. Métodos de toma de decisión	11
3.2. Métodos para la movilidad	13
3.3. Reducción de mensajes de señalización	14
3.4. Cooperación entre puntos de acceso o nodos móviles	14
4. Impacto de la latencia de handover en redes WLAN	17
4.1. Aplicaciones multimedia	18
4.1.1. Aplicaciones multimedia en tiempo real	18
4.2. Factores que influyen en el desempeño de las aplicaciones multimedia	19
4.2.1. Medidas subjetivas de la calidad de servicio	19
4.2.2. Medidas objetivas de la calidad de servicio	19
4.3. El tiempo de latencia en la calidad de la aplicación	20

4.4. Un nuevo enfoque para la reducción de los tiempos de latencia de handover en redes WLAN	21
4.4.1. Descripción de la propuesta	21
5. Evaluación de desempeño	27
5.1. Medidas de desempeño	27
5.2. Herramientas de simulación	28
5.2.1. Simulador de redes	28
5.2.2. Evalvid	29
5.2.3. Patrones de movilidad de los nodos	30
5.3. Escenarios propuestos	32
6. Desempeño del protocolo de handover en redes IEEE 802.11	35
6.1. Protocolos evaluados	35
6.1.1. Escenario 1	35
6.1.2. Escenario 2	36
6.1.3. Escenario 3	36
6.1.4. Resultados	37
7. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro	41
Referencias	43
Apéndice	46
A. El simulador NS-2	49
A.1. Las redes inalámbricas en NS-2	49
B. Análisis de los datos con AWK	53

Lista de Figuras

1.1. Coexistencia de tecnologías inalámbricas.	2
1.2. Handover horizontal.	3
1.3. Pila de protocolos [29].	4
3.1. Tareas del proceso de handover.	10
4.1. Diferentes tipos de datos.	17
4.2. Algoritmo para la reducción de la latencia durante un HO.	25
5.1. Archivos generados por Evalvid	30
5.2. Escenario 1: Cuatro APs y dos nodos móviles.	33
6.1. Tiempos de latencia del escenario 1.	37
6.2. Tiempos de latencia del escenario 1 y 2.	38
6.3. Tiempos de latencia de los tres escenarios.	39
6.4. Porcentaje total de paquetes perdidos.	39
6.5. Retardo de extremo a extremo.	40
A.1. Elementos principales de un modelo de red en NS-2.	50

Lista de Tablas

6.1. Parámetros de simulación para el escenario 1.	36
6.2. Parámetros de simulación para el escenario 2.	36
6.3. Parámetros de simulación para el escenario 3.	37

Introducción

El uso de las comunicaciones inalámbricas se ha incrementado drásticamente en los últimos años; el surgimiento de diversas tecnologías ha permitido este escenario. Sin embargo, estas continúan en desarrollo para satisfacer la demanda de servicios cada vez mayor que existe en la actualidad, debido a la cantidad creciente de usuarios de tecnologías inalámbricas [6].

Las redes inalámbricas han alcanzado un gran desarrollo, debido a la demanda de servicios que se incrementa continuamente. Existen distintas clases de servicios, entre los más comunes se encuentran las aplicaciones como el correo electrónico, los buscadores de contenido, la mensajería y en los años más recientes mensajería multimedia y aplicaciones en tiempo real como son videoconferencias, o voz sobre IP (VoIP). Estas aplicaciones cuentan con restricciones especiales, y son un caso particular de estudio, debido a la demanda de recursos que necesitan y a requerimientos mínimos de servicio por parte de la red sobre la cual se ejecutan; además de restricciones por parte del usuario. Por ello es que se merecen un apartado especial en los estudios sobre calidad de servicio en redes inalámbricas.

Las comunicaciones inalámbricas en el mundo actual son parte importante en diversos ámbitos de la investigación científica, como por ejemplo, en medicina, en entretenimiento, en información, y en distintos campos de la ciencia; por lo que no es difícil imaginar en la actualidad un escenario como el de la Figura 1.1 en donde diversas tecnologías inalámbricas coexisten: redes de área local, redes de área metropolitana WMN, redes UMTS, entre otras. El desarrollo de este trabajo de investigación se centra en las redes inalámbricas de área local, mejor conocidas con el término WLAN, del inglés Wireless Local Area Network. Esta tecnología es una de las más utilizadas actualmente, debido al gran desarrollo que ha tenido desde mediados de los años 80's, por lo que muchos de los dispositivos que se encuentran funcionando en el mercado actual la utilizan. Otra de las razones de su popularidad, es el bajo costo de un dispositivo que cuente con este tipo de tecnología.

Las redes inalámbricas de área local, están regidas por el estándar 802.11 de la IEEE [13], este estándar cuenta con diversas versiones, sin embargo, las más utilizadas son 802.11b y 802.11g. La primera versión del protocolo 802.11 fue publicada en 1999, y en el año 2003 la IEEE reafirmó el estándar con algunas modificaciones. En el año 2007 se realizaron diversas enmiendas a la versión publicada en 2003, las cuales incluían las del 802.11 a, b, d, g, h, i, j, e. En la actualidad, las últimas enmiendas del estándar 802.11 publicado en 2007, incluyen

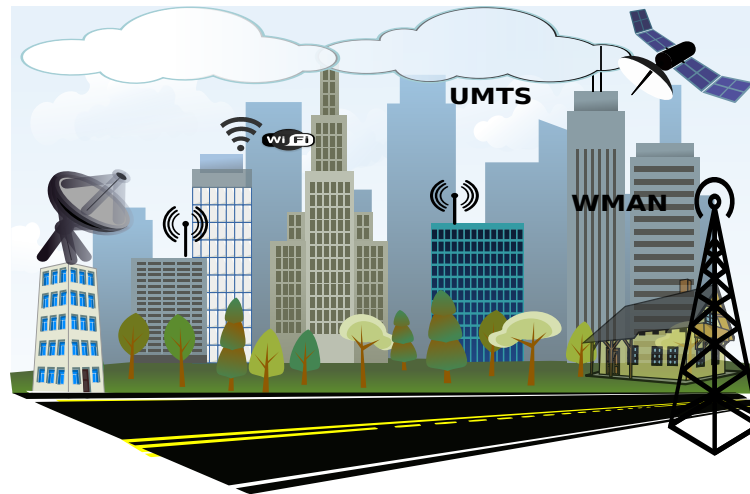


Figura 1.1: Coexistencia de tecnologías inalámbricas.

anexos sobre protocolos que permiten una velocidad superior a los megabits por segundo, y sobre protocolos para distintos tipos de redes, como el 802.11p para redes vehiculares, por mencionar un ejemplo [13]. Durante el desarrollo del presente trabajo, se consideró la versión 802.11b.

Las redes WLAN, al igual que las diferentes tecnologías inalámbricas que existen, buscan satisfacer las necesidades del usuario; dos de las principales demandas que exigen los usuarios son:

- **Conectividad**, es decir, cuando el usuario móvil está en continuo movimiento su conexión a la red no debe verse afectada, a pesar de cambiar de punto de acceso.
- **La calidad de servicio**. Como mencionamos anteriormente, muchas aplicaciones necesitan para poder ser ejecutadas, requerimientos de red mínimos. La calidad de servicio se puede caracterizar por distintos parámetros; estos pueden ser: la tasa de transmisión de datos, el tiempo que el dispositivo móvil tarda en adquirir una nueva conexión, el retardo de extremo a extremo, la seguridad que ofrece la red, la variabilidad del retardo, e incluso el costo de conexión a determinada red.

1.1. Contexto y problemática

La **latencia**, es el tiempo total que tarda un nodo móvil sin poder recibir ni enviar paquetes, y en adquirir una nueva dirección IP para el caso de handover vertical, y la reconfiguración para el caso de un handover horizontal. Es decir, se define como el tiempo total que tarda en completarse todo el proceso de handover [1].

Un evento de handover puede clasificarse con base al tipo de tecnología con que cuenta la red hacia la cual se realiza el traspaso. Existen dos tipos de handover cuando la clasificación se da por el tipo de red a la cual emigra el dispositivo móvil, el handover vertical y el horizontal.

El handover horizontal, es aquel que se realiza cuando un nodo móvil cambia de punto de acceso a otro de la misma tecnología, como se ilustra en la Figura 1.2, en este caso el traspaso del dispositivo móvil entre una red y otra se realiza dentro de redes de la misma tecnología. Para esta figura, son redes inalámbricas de área local.

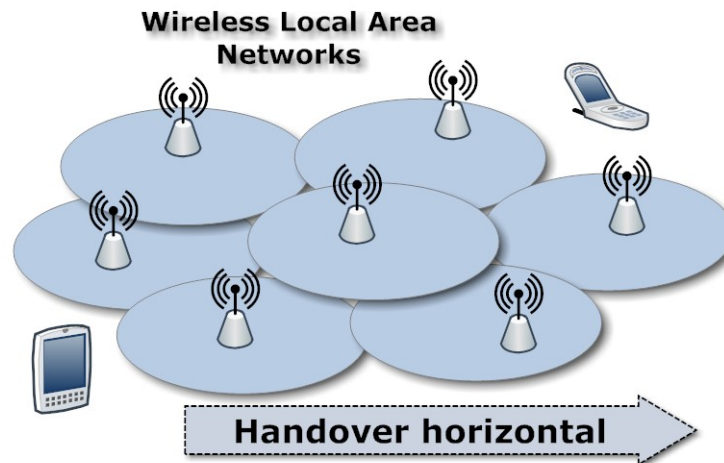


Figura 1.2: Handover horizontal.

La realización de un evento de handover vertical en cambio, ocurre cuando se cambia de punto de acceso a otro que pertenece a una red de diferente tecnología entre las existentes como pueden ser WMAN, redes UMTS, Bluetooth por mencionar algunas de ellas; sin embargo este trabajo se centra en el estudio de la latencia de handover horizontal en redes bajo el estándar IEEE 802.11 [13].

El tipo de aplicaciones estudiadas en este trabajo, son las aplicaciones multimedia en tiempo real. Las aplicaciones en tiempo real tienen restricciones particulares en el tiempo de ejecución, por lo que no se pueden implementar sobre redes con políticas *best-effort*, a menos que se realicen algunas modificaciones; para ello se han propuesto protocolos especiales que dan soporte para este tipo de aplicaciones, como son, el protocolo *Real Time Streaming Protocol* (RTSP) [2], o algunos otros protocolos de la capa de transporte como son los protocolos RTP del término en inglés *Real-time Transport Protocol* y RTCP *Real Time Control Protocol* [18].

Como mencionamos anteriormente, existen muchos protocolos que permiten que una comunicación se lleve a cabo entre dos sistemas, es decir, para que funcione un enlace de comunicación entre dos dispositivos diferentes se necesita cumplir con diversas tareas, las cuales son divididas para su estudio e implementación en niveles o capas. Un modelo común para representar esto, es el modelo OSI, llamado así por sus siglas en inglés de *The Open*

Systems Interconnection model, que es un marco de referencia en la interconexión de sistemas de comunicación, y otro comúnmente utilizado también, es el enfoque de los protocolos TCP/IP. En la Figura 1.3 podemos ver a grandes rasgos, estos dos modelos.

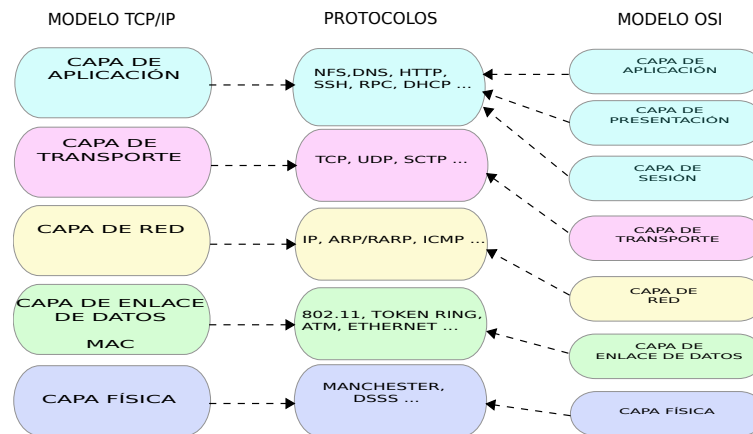


Figura 1.3: Pila de protocolos [29].

Cada aplicación tiene sus propios requerimientos, algunas toleran mejor las pérdidas o las retransmisiones de datos que otras. Eso se especifica en los estándares del tipo de flujo de datos al que se refiera; por lo general, las aplicaciones multimedia no son tolerantes a grandes retardos ni al tiempo de desconexión que se ocasiona muchas veces por el proceso de handover.

Las redes WLAN no fueron diseñadas en un inicio para soportar este tipo de aplicaciones, pero se han realizado modificaciones al estándar IEEE 802.11b [14], surgiendo una variante de éste conocida como IEEE 802.11e [13], que realiza modificaciones a los mecanismos que se requieren para dar soporte a aplicaciones en tiempo real y permitiendo características de calidad de servicio (QoS), por medio de priorizar el tráfico que generan las aplicaciones multimedia dentro de la red, crea categorías de prioridad, poniendo a los flujos multimedia con mayor prioridad que aplicaciones elásticas como texto u otras. Esto resulta benéfico en el sentido de que muchos de los usuarios de las tecnologías de comunicación inalámbricas demandan el uso de aplicaciones en tiempo real, y que la mayoría de los dispositivos móviles cuentan con este tipo de tecnología en particular.

1.2. Motivación

La transmisión de datos multimedia representa un problema cuando los recursos de la red son mínimos, además, surge otro problema anexo a ello, que es, la movilidad de los usuarios de una red. Un nodo que se encuentra en una trayectoria en movimiento, necesita cambiar de punto de acceso para mantener la continuidad de la comunicación, esto involucra

diferentes tareas que en su conjunto se les denomina **proceso de handover**. Este proceso también es conocido como *traspaso de red* por su traducción del término en inglés. A lo largo del desarrollo de este trabajo, se utilizan ambos términos indistintamente. La forma en que actualmente se lleva a cabo el traspaso de red en una WLAN cuando se está transmitiendo una aplicación multimedia y el usuario está en continuo movimiento resulta poco eficiente. Por lo cual, realizar un estudio detallado de los efectos obtenidos durante este tipo de escenario es la motivación principal de este trabajo.

1.3. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia que tiene el proceso de handover en la calidad de servicio para una aplicación en tiempo real. La latencia y la pérdida de paquetes son algunos de los factores principales que afectan para que el proceso de handover se realice de forma transparente, es decir, que el usuario no perciba si se cambió de punto de acceso (AP), manteniendo siempre una calidad constante en la transmisión.

1.3.1. Objetivo general

- El objetivo general de este trabajo es estudiar el efecto causado por el tiempo de latencia de handover en el desempeño de una aplicación multimedia; específicamente durante la transmisión de un flujo de video.

1.3.2. Objetivos particulares

Los objetivos particulares de este trabajo incluyen:

- Realizar un profundo estudio del estado del arte referente a la latencia en redes WLAN y en mecanismos propuestos para la mejora de la calidad de las aplicaciones multimedia en este tipo de redes.
 - Realización de un marco de referencia para la evaluación objetiva de aplicaciones multimedia en redes WLAN.
 - Elección y estudio de las herramientas que permitan obtener un marco de evaluación de transmisión de aplicaciones multimedia en redes inalámbricas de área local.
 - Realización de programas que permitan el análisis de resultados, con esto se complementa el objetivo anterior.
-

- Incorporar patrones de movimiento a los nodos, para cumplir con la características del contexto de este trabajo y poder evaluar si influye o no en los resultados de las simulaciones la elección de un patrón de movimiento específico.
- Proponer una extensión al protocolo de handover para redes IEEE 802.11. Para poder reducir el tiempo de latencia de handover.

Para ello, primeramente se presenta un breve estado del arte de trabajos de investigación de handover sobre redes WLAN, para poner en contexto el tema mencionado, posteriormente se realiza el planteamiento del problema de manera particular y formal, permitiendo con ello, la elección de los mejores escenarios que se adaptan a este trabajo, además de que en el proceso se elige el software necesario para poder llevar a cabo la evaluación de los escenarios planteados, y realizar exhaustivas simulaciones computacionales con dichos escenarios.

Cabe mencionar que una parte importante del trabajo descrito en los párrafos anteriores, es la recopilación y el desarrollo de las herramientas necesarias para la evaluación de la calidad de transmisiones multimedia por usuarios móviles, dentro de una red inalámbrica de área local. Aunado a la evaluación de los puntos mencionados en los objetivos y obtener el conjunto de mediciones de dichos parámetros de calidad. Además, se incorporaran diversos patrones de movimiento a los nodos, para poder obtener un escenario más robusto durante las simulaciones realizadas. La descripción de los patrones utilizados, se realiza en el Capítulo “Impacto de la latencia de handover”, en donde se justifica la utilización de cuatro diferentes patrones de movimiento.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2, se presenta un resumen de algunos de los trabajos relacionados con el proceso de handover y la manera en que se enfocan a resolver los efectos causados por la latencia, es decir, la forma en que se ven afectadas las aplicaciones que se estén ejecutando. En el Capítulo 3, se describe el proceso de handover horizontal en redes WLAN y se explica el conjunto de tareas que se llevan a cabo durante dicho proceso. En el Capítulo 4, presentamos la problemática ocasionada por el tiempo de latencia de un traspaso de red y una descripción general de lo que son las aplicaciones multimedia. Además, se incluye una descripción de la propuesta para la reducción de los tiempos de latencia.

En el Capítulo 5, se describen los parámetros de evaluación de desempeño que se utilizan para el desarrollo de este trabajo, los cuales nos permiten caracterizar de manera objetiva el desarrollo de una aplicación multimedia en tiempo real. Incluyendo en este mismo capítulo la descripción de las herramientas de simulación utilizadas para alcanzar los objetivos planteados. Se presenta también, la descripción de todas las herramientas utilizadas para el análisis de los resultados, y por último la justificación y descripción completa de los escenarios de red propuestos para dicha evaluación. En el Capítulo 6, presentamos los resultados de las evaluaciones realizadas a los escenarios propuestos, con sus diferentes variantes, este capítulo representa una parte importante, debido a la presentación, explicación y justificación de los resultados obtenidos durante las simulaciones.

Por último, se presenta un breve resumen del trabajo realizado, y de los resultados obtenidos y se concluye con algunas recomendaciones para trabajo futuro.

Trabajo relacionado

La latencia ocasionada por un evento de handover, es el tema principal de algunos trabajos de investigación; en ellos se muestran mejoras a las técnicas del proceso de handover existentes y a la manera de transmitir aplicaciones multimedia, todas con el fin de mantener la calidad de la aplicación. Se cuenta con enfoques diferentes, ya sea aplicar los modelos propuestos en un escenario de simulación o implementar en alguna infraestructura física dichos modelos.

2.1. Latencia de handover

Los estudios sobre latencia de handover en redes WLAN se han incrementado debido a la popularidad creciente de transmisión de contenido multimedia en este tipo de redes, además de la necesidad de tener mayor velocidad en la transmisión de datos, la latencia de handover es otro asunto importante a tratar para evitar cuellos de botella y para dar soporte a aplicaciones en tiempo real [4].

Una red inalámbrica de área local soporta la transmisión de aplicaciones multimedia si su ancho de banda, retardos y variabilidad en el retardo son los óptimos, aún en presencia de eventos de handover, sin embargo es muy importante que la latencia sea reducida al máximo; aplicaciones como VoIP y video requieren de latencias menores a los 200 ms y pérdida de paquetes de a lo más 3%, por esta motivación, los autores del trabajo [22], realizan una propuesta para disminuir el tiempo de latencia en este tipo de escenarios.

Las distintas soluciones propuestas se pueden agrupar con base en las tareas que modifican del mecanismo original de handover; trabajos como [23, 24] proponen modificaciones al protocolo de handover en capa MAC (*Medium Access Control*), incluyendo la cooperación entre dispositivos móviles presentes dentro de la misma red para reducir el tiempo que tarda en tomar una decisión el nodo móvil respecto a cuál de los puntos de acceso que se encuentren disponibles debe migrar; reduciendo con ello la latencia de handover.

Otra de las investigaciones que abordan este tema, podemos mencionar a [9] en donde se presenta un estudio en el cual la degradación de la calidad de un flujo de video MPEG4 se ve afectada por la pérdida de paquetes durante la realización de un evento de handover. Dicho

estudio se enfoca en proponer un modelo analítico que explique los efectos de la pérdida de paquetes en la calidad del flujo de video y evaluarlo por medio de simulaciones.

En [10], se propone un mecanismo de calidad de servicio en redes 802.11 para tráfico de VoIP, proponiendo una solución práctica de la configuración de los parámetros de operación de los puntos de acceso de una red de área local, reduciendo con ello el tiempo de latencia de handover e incrementando la calidad de la aplicación, en este caso de transmisión de VoIP. Esta propuesta, se evalúa por medio de simulaciones realizadas con el simulador de redes NS-2 [15]. Los resultados de este trabajo se reportan en términos de parámetros objetivos como tasas de transmisión, retardos, cantidad de paquetes perdidos, entre otros, demostrando así, de qué manera se afecta a las aplicaciones en curso.

El trabajo presentado en [1], estudia el efecto de la latencia de handover en una aplicación en tiempo real. En este estudio, los autores definen las técnicas de toma de decisión de handover utilizadas en la evaluación de dicha propuesta. Además, proponen un método de histéresis variable para reducir la cantidad de eventos de handover innecesarios y reducir la latencia, acotando el escenario de simulación a la transmisión de video con codificación H.264 [11]. Si existe pérdida de paquetes, algunas de las tramas del video pueden resultar dañadas e incluso no poderse recuperar, por lo tanto, la calidad disminuye ya que la velocidad de los fotogramas en la secuencia se reduce. Pero la consecuencia de una imagen perdida en una secuencia de video, dependerá del tipo de imagen.

El modelo propuesto en [12], presenta una solución para minimizar los efectos causados por el tiempo de latencia de un proceso de handover en una red WLAN. A diferencia de los estudios anteriores, este trabajo no se enfoca en describir el modelo que caracterice los efectos de la latencia de handover, sino que aborda el problema para reducir dichos efectos, proponiendo una nueva técnica para la toma de decisión en dicho proceso, basados en el estándar 802.11, reduciendo con ello la latencia total del proceso de handover. Para ello, los autores proponen un modelo llamado HODSTAT por sus siglas en inglés de The Handover Decision Stability Technique. Cabe mencionar que el principal aporte de esta técnica, es el modelo para la reducción de los eventos de handover innecesarios, el cual está basado en la técnica de histéresis variable.

Como se puede observar, con base en la revisión del estado del arte sobre latencia de handover en una red inalámbrica de área local para la transmisión de aplicaciones en tiempo real, los estudios se enfocan en mejorar la calidad de las aplicaciones ejecutadas, abordando esta problemática desde diferentes enfoques, ya que para la ejecución de una transmisión de video u otra aplicación en tiempo real, se necesita de una serie de protocolos en diferentes capas, ya sea en la capa de transporte, en la de aplicación o en la capa MAC, reduciendo el tiempo de la toma de decisión o en la parte de la ejecución reduciendo el tiempo de escaneo.

Handover horizontal en redes WLAN

El proceso de handover consiste en una serie de procedimientos que se realizan para que un nodo móvil cambie de punto de acceso al que está conectado; existen varias razones por las que un nodo móvil ejecuta un evento de handover, algunas tienen que ver con la disminución de potencia de la señal recibida, la saturación de la estación base, la calidad de servicio que brinda determinada red, entre algunas otras que se describen con más detalle a lo largo de este capítulo. Las tareas realizadas durante un evento de handover pueden dividirse para su estudio en tres grupos, el primero que comprende las tareas de iniciación o exploración, el segundo que incluye las tareas de autenticación y por último, el que comprende las tareas de reasociación. En los siguientes párrafos, se realiza una breve reseña de cada una de estas.

- **Tareas de iniciación o exploración.** Estas tareas involucran actividades como el barrido del canal, con lo cual el nodo móvil detecta las señales de los puntos de acceso que se encuentren dentro de su rango de alcance, también se clasifican en este apartado todas las tareas que tienen que ver con la toma de decisión, una vez que el nodo móvil ha detectado las señales de los puntos de acceso disponibles, tiene que realizar un proceso de toma de decisión, en la cual elige el punto de acceso más apto hacia el cual migrar.
- **Tareas de autenticación.** En este apartado encontramos una serie de pasos que se llevan a cabo por parte del nodo móvil y del nuevo punto de acceso al cual migrará. Todas ellas conllevan al establecimiento de la conexión entre el nodo móvil y el punto de acceso. Dentro de estas tareas se encuentran: el nodo envía una solicitud de autenticación al AP; el AP manda la respuesta a esta petición y después de esto, el AP actualiza el registro de usuarios a los cuales está prestando servicio. Y por último, el nodo móvil que envió la solicitud de autenticación, también actualiza su registro del punto de acceso al cual estará ahora asociado.
- **Tareas de reasociación.** Las tareas de reasociación, como su nombre lo menciona, implican que las sesiones del nodo móvil asociadas a su enlace anterior se redirijan al nuevo enlace creado. La parte del redireccionamiento implica que el punto de acceso anterior participe en redirigir los paquetes hacia la nueva conexión entre el nodo y el punto de acceso nuevo.

De forma general, las tareas del proceso de handover mencionadas en el párrafo anterior, podemos verlas en la Figura 3.1 en donde se puede apreciar que la mayor cantidad de tiempo durante el proceso de traspaso de red, es el que se invierte en las tareas de la fase de escaneo, debido a que el nodo móvil envía varios mensajes de prueba dirigidos a distintos puntos de acceso que se encuentran dentro de su rango de alcance; cuando recibe respuesta de alguno de ellos, evalúa la mejor opción y es hasta entonces cuando inician las tareas de asociación con el nuevo AP, por lo cual el tiempo consumido en encontrar el nuevo AP es mucho mayor al que se tarda en realizar las tareas restantes para el traspaso de red[21].

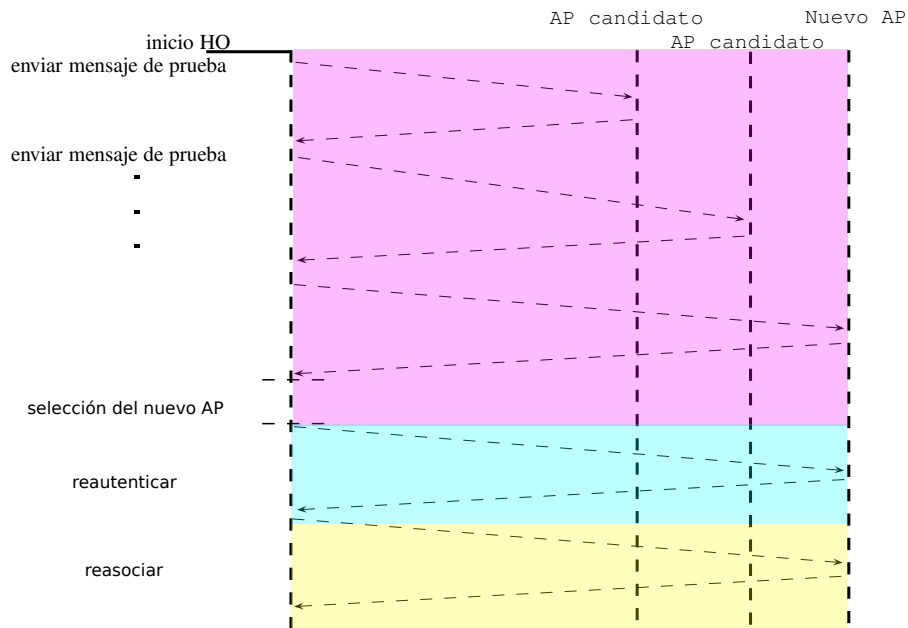


Figura 3.1: Tareas del proceso de handover.

Para lograr un proceso de handover transparente, siempre se busca que tanto la parte de la toma de decisión como la de ejecución y las demás tareas involucradas, se realicen de forma eficiente, minimizando los tiempos de latencia e incrementando con esto la calidad del enlace; permitiendo así, que la calidad de las aplicaciones multimedia en tiempo real no resulten afectadas durante este proceso. El manejo de la movilidad dentro de una WLAN puede abordarse de diferentes formas, otra manera de clasificar las tareas realizadas durante este proceso es como se describe en [3], en donde se menciona que los procedimientos de movilidad se pueden clasificar por categorías dependiendo del tipo de capa en donde se ejecuten las tareas, como pueden ser: soluciones en la capa de red, en la capa de enlace o soluciones *cross-layer* que involucran actividades tanto de la capa de red como de la capa de enlace de datos.

Los trabajos realizados en este campo de la investigación, se pueden agrupar con base en las tareas que involucran. En las siguientes secciones, se describen algunos de los trabajos más

relevantes en cada área, para poner en contexto las diferentes soluciones que se presentan para la reducción del tiempo de latencia dentro de una WLAN, utilizando esto como preámbulo del estudio realizado dentro de este trabajo de investigación.

3.1. Toma de decisión en el proceso de handover

La toma de decisión es un aspecto muy importante dentro de las tareas del proceso de handover, esta decisión implicaría cambios en la calidad de la aplicación que se esté ejecutando, debido a que la decisión tomada impacta directamente con el tiempo de latencia. Existen diversos aspectos a considerar para decidir cuándo un dispositivo móvil debe cambiar a una nueva red; algunos de estos son [19]:

- **La potencia de la señal recibida.** Cuando hay una disminución de ella en el punto de acceso al cual se está conectado, se busca cambiar a otra con mayor potencia. Este tipo de criterio es el más utilizado en un tipo de red como la WLAN.
- **Saturación de la estación base.** Cuando la estación base sobrepasa el límite de usuarios que pueden ser atendidos, se busca una nueva estación base para algunos de los usuarios de la estación saturada.
- **El tipo de servicio que requiera el usuario móvil.** Si la estación base no satisface los requerimientos de la aplicación, se debe migrar a otra que pueda prestar dicho servicio.
- **La seguridad.** Para algunas aplicaciones, la confidencialidad e integridad de los datos transmitidos es primordial, por lo que el tipo de seguridad brindada por la red, es un criterio principal a considerar al momento de realizar la elección del punto de acceso hacia el cual se realizará el traspaso.
- **El tiempo de conexión a la red.** Algunas redes proporcionan sus medidas de desempeño promedio, en este caso el tiempo de conexión a una red en particular, por lo que se considera un parámetro para la toma de decisión dependiendo del tipo de aplicación ejecutada.
- **Ancho de banda disponible.** Este parámetro informa de los recursos disponibles expresados en bits/s. Puede ser utilizado como un indicador de tráfico; este parámetro es considerado sobre todo por aplicaciones sensibles al retardo.

3.1.1. Métodos de toma de decisión

La decisión que toma el dispositivo móvil referente a cual red debe emigrar, está basada en diversos criterios, el más común es considerar la potencia de la señal recibida, también

conocida como “mejor servidor”; es decir, migrar hacia el AP que presente la mayor potencia en su señal. Sin embargo, las investigaciones van en el sentido de tomar en cuenta más criterios además de este, con el fin de lograr que la decisión tomada sea mejor, para poder disminuir el número de pérdidas y mantener la continuidad de la comunicación. En la literatura, existen diversas investigaciones que recopilan los principales criterios considerados en la toma de decisión de un handover horizontal, descritos en trabajos como [5, 6], de los cuales cabe destacar como los más utilizados y de mejor desempeño, los siguientes:

- **Mejor servidor.** El único criterio que toma en cuenta, es el punto de acceso que tenga mayor potencia de señal recibida por el móvil, migrando el nodo móvil hacia el punto de acceso de mejor servicio. La principal ventaja de este enfoque es que el nodo se mantiene siempre en el AP con mayor potencia en su señal. Pero, una desventaja es que el número de eventos de handover realizados por un nodo en movimiento podría llegar a ser muy grande debido a que estaría cambiando constantemente de AP, generando problemas en la comunicación.
 - **Histéresis fija.** El handover se realiza cuando la intensidad de la señal sobrepasa cierto valor h , llamado valor de histéresis, el cual es tomado de estudios teóricos y prácticos que establecen el valor óptimo en decibelios de éste. Existen variados estudios de la efectividad de utilizar este método, y de qué valores son los que presentan mejor rendimiento. Desde los años 90's esta técnica ha tenido gran desarrollo, surgiendo distintas variantes y adaptaciones a este método. A grandes rasgos, el método funciona así: cuando el valor de la potencia del punto de acceso al que se está conectado más la suma del valor h , es menor que el de algunos de los puntos de acceso detectados por el dispositivo móvil, entonces se realiza el handover. Esto se propuso con el fin de reducir el número de eventos de handover innecesarios, ya que el valor de h proporciona un rango para que no se realice el proceso de handover de manera frecuente, permitiendo al nodo móvil cambiar de punto de acceso, sólo cuando esto sea necesario.
 - **RSSHT.** Del inglés *Relative Signal Strength with Hysteresis and Threshold*, propone como mejora al método anterior la definición de un valor de umbral. Si el valor de la potencia del punto de acceso actual es mayor que el valor de umbral definido y además se cumple la condición descrita en la técnica de histéresis fija, el proceso de handover se lleva a cabo.
 - **Histéresis variable.** Este método es una nueva propuesta presentada en [5]. Es una mejora a la técnica de RSSHT, que en lugar de utilizar valores fijos para el valor de histéresis, se cuenta con un margen variable, de tal forma que cuando la potencia de la señal es alta, se aumenta el valor de h , reduciendo la probabilidad de que suceda un evento de handover, mientras que cuando el valor de la potencia de la señal es bajo, se disminuye el valor de h , para que sea más probable que el handover se realice. Esta técnica muestra un mejor desempeño en el sentido de disminuir el número de handover innecesarios, esto en comparación con las tres mencionadas anteriormente.
-

La toma de decisión consiste en evaluar una serie de criterios y tomar en cuenta el tipo de aplicación que se ejecute, para que se elija él o los criterios a considerar y que cada uno reciba una ponderación al momento de la decisión. Cabe resaltar que la lista de criterios citados en el párrafo anterior, funcionan sólo para redes de la misma tecnología, es decir para los casos de handover horizontal, cuando se realiza un handover vertical se toman en cuenta más criterios además de los antes mencionados.

Como se puede ver, la parte de toma de decisión involucra directamente un criterio importante que es, la reducción del número de veces que un nodo móvil cambia de red, es decir minimizar el número de eventos de handover innecesarios durante una transmisión, es una de las técnicas utilizadas para mejorar la calidad de una transmisión multimedia dentro de una WLAN. En algunos trabajos, este método es denominado efecto *ping-pong*, el cual, por definición, es el fenómeno ocasionado cuando un nodo móvil cambia repetidas veces a diferente punto de acceso al cual está conectado en un lapso muy corto de tiempo. Este fenómeno incrementa el tiempo promedio de latencia durante el desarrollo de una transmisión, lo cual decrementa la calidad de la aplicación.

3.2. Métodos para la movilidad

Los métodos utilizados para realizar las tareas de ejecución del handover, es decir, la movilidad de los nodos en redes WLAN, son protocolos encargados de llevar a cabo las tareas para cambiar de punto de acceso una vez que se ha realizado el proceso de toma de decisión, teniendo identificado el punto de acceso al cual el nodo móvil emigrará. Algunos de los protocolos utilizados son [6]:

- **Hard Handover (HHO)**. Antes de iniciarse el handover, el nodo móvil hace un barrido del canal para detectar los APs más cercanos, y después de localizarlos, se inicia el proceso de asociación, durante el proceso de handover, el nodo toma una decisión del AP al que quiere asociarse, una vez seleccionado, se inicia el handover; el nodo móvil se sincroniza con el nuevo enlace y se obtienen los parámetros, entonces, el AP envía el mensaje de autorización y se autentifica al nuevo usuario, y se termina el proceso de handover.
 - **Soft Handover (SHO)**. Este proceso es similar al HHO, pero a diferencia, en el SHO, el nodo móvil se asocia a más de un AP, reduciendo el tiempo de desconexión, pero aumentando la cantidad de recursos utilizados.
 - **Fast Base Station Switching (FBSS)**. En este método, el nodo móvil se encuentra enviando y recibiendo paquetes de y hacia un solo AP, éste se comunica con el conjunto de AP activos para compartir información de contexto, y basándose en esta información, se toman las decisiones de handover y se inicia el proceso de traspaso. También utiliza más recursos de red, pero comparado con el SHO, ocupa menos recursos porque solo se conecta con un solo AP.
-

3.3. Reducción de mensajes de señalización

La reducción de mensajes de señalización es otra de las técnicas utilizadas para disminuir el tiempo de latencia de handover. Las investigaciones realizadas en este campo incluyen trabajos con métodos *cross-layer* como [20], en el cual se presenta una propuesta de un esquema de handover controlado para poder seleccionar de manera eficiente una interfaz de radio de acuerdo a los retardos de la aplicación, a la calidad del enlace inalámbrico de las dos interfaces de red. Para ello, se busca una función de coordinación y de elección de las interfaces que contiene el nodo móvil. A grandes rasgos, cuando el controlador de handover detecta que una WLAN tiene mejor calidad en el enlace, decide migrar a ella.

3.4. Cooperación entre puntos de acceso o nodos móviles

Las técnicas que involucran tareas de cooperación, ya sea entre los puntos de acceso o entre los nodos móviles, o ambos, es otro campo de investigación dentro de las técnicas para la reducción de los tiempo de latencia en una WLAN. Uno de los trabajos de investigación en éste tema es [21], en la cual los autores proponen un nuevo protocolo de handover de capa MAC. La propuesta consiste en utilizar mensajes de advertencia enviados de un nodo móvil a otros nodos móviles dentro de la misma red, con el contenido de la información de cuáles puntos de acceso están disponibles dentro de su vecindario, creando con ello una red de nodos móviles vecinos cooperando entre ellos para obtener la información actualizada de los puntos de acceso dentro de su vecindario.

Con la información actualizada se logra que, al momento de realizar un traspaso de red, el nodo móvil cuente con la información sobre cual es el punto de acceso que más le conviene en términos de disponibilidad de dicho punto de acceso. Dejando como restricciones que si no se cuenta con los vecinos suficientes, es decir con la suficiente información, el proceso de handover deberá realizarse de forma tradicional.

Esta propuesta es evaluada por los autores por medio de simulaciones, utilizando el simulador de redes ns-2 [15], con lo cual presentan resultados que demuestran que con su propuesta de protocolo de handover de capa MAC, los tiempos de latencia se reducen hasta menos de 50 ms, cumpliendo con ello las restricciones de tiempo de latencia de las aplicaciones multimedia.

Uno de los principales trabajos en esta área del conocimiento, está redactado en el artículo [25], en donde se describe como método de reducción de la latencia, un escaneo proactivo, este es en pocas palabras un módulo de software que reside en el controlador de la tarjeta de red (NIC) del dispositivo móvil, el cual toma las decisiones de handover. Dos piezas importantes permiten que esto se realice, una es la utilización de un algoritmo adaptable que determina el tiempo de escaneo y la otra es la variación de la frecuencia con la cual el móvil

escanea los canales del punto de acceso dentro de su rango de alcance; logrando con estas técnicas disminuir la latencia en los diferentes trasposos de red que efectúe el nodo móvil.

Este artículo es el precedente de varios trabajos de investigación que utilizan el escaneo proactivo como técnica de reducción de la latencia. Una de las ventajas de este método es, que se implementa en los usuarios, como un módulo de software, ayudando con ello a que no se tenga que cambiar todo el hardware existente. Otra de las ventajas es que no depende de la presencia de vecinos dentro del rango de alcance del usuario móvil.

Impacto de la latencia de handover en redes WLAN

Las aplicaciones multimedia en tiempo real tienen restricciones particulares para su correcto desempeño, esto debido al tipo de datos que se transmiten durante dichas aplicaciones; se necesita cumplir con características específicas tanto de parte de la red que está ofreciendo el servicio, como del usuario. Los datos multimedia se caracterizan precisamente por cumplir con restricciones diferentes a las de las aplicaciones elásticas como correo electrónico, por ejemplo. Algunas de estas restricciones y características las podemos encontrar en los párrafos siguientes.

El término multimedia se refieren a los diversos tipos de datos utilizados para representar información [32], algunos de ellos pueden ser: texto, imágenes, video, audio, como hace referencia la Figura 4.1.

Para las redes de comunicación, las aplicaciones multimedia se pueden clasificar en dos tipos: aplicaciones multimedia en tiempo real y aplicaciones multimedia simples.



Figura 4.1: Diferentes tipos de datos.

4.1. Aplicaciones multimedia

Se considera que la transmisión de datos multimedia tolerantes al retardo, a diferencia de las aplicaciones en tiempo real, no tienen restricciones en los retardos y en el tiempo de presentación, este tipo de aplicaciones se consideran tolerantes al retardo, refiriéndose con ello a que se pueden presentar mayores retardos en la transmisión de los datos, sin que esto afecte considerablemente el desempeño de la aplicación. Un par de ejemplos de estas pueden ser: streaming multimedia y video a la demanda (VoD) por sus siglas en inglés. Este tipo de aplicaciones no son estudiadas en este trabajo, por lo que no profundizamos en su descripción, sin embargo, cabe mencionarlas porque este trabajo presenta la plataforma para poder evaluarlas en trabajos futuros.

4.1.1. Aplicaciones multimedia en tiempo real

La principal característica de las aplicaciones multimedia en tiempo real, es la restricción en tiempo, por ejemplo, no se permite el reenvío de paquetes porque el tiempo de presentación de los datos es más importante a que los datos lleguen completos. En este tipo de comunicación, siempre existe pérdida de información, por lo cual, la recuperación de información y corrección de errores, es una tarea importante por parte del decodificador de video y/o audio del lado receptor, para poder obtener la mayor cantidad de información de la transmisión.

Los mecanismos de calidad de servicio (QoS) por parte de la red, no siempre son implementados, la mayoría de las aplicaciones se desarrollan sobre redes *best-effort*, sin embargo, para mitigar las restricciones que tienen las Aplicaciones Multimedia en Tiempo Real (AMTR), se emplean mecanismos en la parte de la aplicación, para poder reducir al máximo los efectos causados por no tener una política de calidad de servicio, como son: la pérdida de paquetes, los retardos de extremo a extremo, entre otros, que son explicados posteriormente en este trabajo. Además de las técnicas mencionadas que son implementadas en la parte de la aplicación, existen muchas otras utilizadas para mejorar la calidad de una aplicación multimedia, como mencionamos en capítulos anteriores. Una de esas técnicas es reducir el tiempo de handover desde la perspectiva del dispositivo móvil, por ejemplo, disminuyendo el tiempo que tarda en la fase de exploración, como se explica en el capítulo anterior.

Una de las aplicaciones multimedia en tiempo real más utilizadas es la transmisión de flujos de video. Esta aplicación tienen peculiaridades y restricciones que cumplir, como se indicó en párrafos anteriores; los fenómenos que más les afectan son: la latencia, la pérdida de paquetes y el retardo de extremo a extremo; fenómenos que se estudian en este trabajo de investigación y se reporta la información obtenida de ellos, permitiendo ver cómo afectan a este tipo de aplicaciones.

El trabajo presentado en esta investigación, estudia los efectos causados por el tiempo de handover, en donde se puede ver la degradación de la calidad de una transmisión multimedia.

4.2. Factores que influyen en el desempeño de las aplicaciones multimedia

Además de que se necesitan características especiales tanto del medio como del usuario para poder realizar una transmisión multimedia, se requieren conocer algunos de los principales factores que influyen directamente en su desempeño, factores con los cuales se pueda determinar la calidad de transmisión multimedia, en sí, se necesitan valores objetivos para caracterizar las transmisiones multimedia. Existen dos enfoques para medir este desempeño, uno es de forma objetiva y el otro de forma subjetiva. Los principales aspectos a considerar en ambos casos se describen en los párrafos siguientes:

4.2.1. Medidas subjetivas de la calidad de servicio

Existen distintas formas en que se mide la calidad de servicio en las aplicaciones multimedia de manera subjetiva, algunas de ellas, son:

- **MOS.** Mean Opinion Score, por sus siglas en inglés, es un método utilizado para evaluar la calidad de la voz en sistemas de telefonía sobre IP. Se dice que es subjetiva, porque se realizan pruebas con personas que califican la calidad del audio; dependiendo de la satisfacción que tengan al escuchar un audio, asignan un valor. Los cinco posibles valores son:
Excelente = 5, Buena = 4, Regular = 3, Mediocre = 2, Mala = 1. Si se calcula la media aritmética de cualquier conjunto de estas calificaciones se obtiene el índice MOS [33].
- **PESQ.** Perceptual Evaluation of Speech Quality, o evaluación de la calidad de la voz por percepción, es una familia de pruebas computacionales que permite evaluar la calidad de una transmisión de voz de tal forma que resulte similar a lo que experimenta un usuario de telefonía IP. Siguiendo esta serie de pruebas estandarizadas, se obtiene una medida subjetiva de la calidad de la voz [34].

Como se ha descrito a lo largo de este trabajo de investigación, nuestro estudio se enfoca en la obtención de medidas de desempeño objetivas, por lo cual se presenta una descripción de estas, con el fin de mostrar los términos con los cuales se evalúa este trabajo.

4.2.2. Medidas objetivas de la calidad de servicio

- **Tiempos de latencia de handover.** Cuando el tiempo que tarda un nodo móvil en cambiar de punto de acceso es superior a 300 ms [7], la calidad de la transmisión en curso se ve afectada, por lo que siempre se busca reducir los tiempos de latencia.

- **Número de eventos de handover realizados.** Si el nodo móvil para cambiar de AP a uno diferente del cual se encuentra conectado, no sigue ninguna otra restricción más que el nivel de potencia de la señal, la calidad de la transmisión se ve afectada debido al tiempo de desconexión entre cada traspaso, en casos en los cuales el nodo móvil (NM) reciba señales de diversos APs y se encuentre realizando traspasos entre uno y otro de manera continua; aún cuando el NM siempre tendrá la mayor potencia de señal, la aplicación se ve afectada. Este comportamiento se conoce como eventos de handover *innecesarios*.
- **Pérdida de paquetes.** Este parámetro mide la cantidad de datos perdidos durante la transmisión. Su valor se calcula como: el número de paquetes recibidos entre el número de paquetes enviados, esto multiplicado por 100. Esta medida se considera como un porcentaje de fiabilidad del canal de transmisión, teniendo el porcentaje de datos recibidos.
- **Variabilidad del retardo.** Es la variación del tiempo de entrega de los paquetes enviados, este parámetro también se mide en milisegundos. Este provoca en muchos casos pérdida de información debido a que los paquetes no llegan en el tiempo que les corresponde para ser presentados, por lo que la mayoría de las veces son descartados y se consideran como pérdidas, disminuyendo con esto la calidad de la aplicación en curso.
- **Retardo de extremo a extremo.** El tiempo promedio que tarda un paquete desde el momento en que es enviado por el nodo emisor, hasta el instante en el cual se recibe, es considerado como el retardo de extremo a extremo, y también caracteriza a la red de comunicación. Entre más pequeños sean los valores promedio de este tiempo, mejor será la calidad de la transmisión, por consecuencia, los datos transmitidos y recibidos serán de calidad superior.

4.3. El tiempo de latencia en la calidad de la aplicación

El impacto que los tiempos de latencia tienen sobre las aplicaciones en tiempo real en redes WLAN, es el tema principal de este trabajo. Esta problemática se ha abordado de diferentes formas; muchos de los trabajos existentes cuentan con estudios detallados de los parámetros de desempeño medidos en una transmisión y la forma en que se ve interrumpida la comunicación cuando la latencia sobrepasa cierto valor de umbral. Por lo general, se considera que, cuando dicho tiempo es mayor a 300 ms, se afecta de manera considerable la aplicación que se esté ejecutando y se considera que este proceso no es transparente para el usuario, siendo perceptible que la calidad del enlace disminuye [7].

Por lo tanto, la latencia ocasionada por el handover, es un factor que influye directamente en la calidad de la comunicación, debido al tiempo que tarda un nodo móvil en establecer

nuevamente la conexión, después que se ha movido de punto de acceso a otro diferente dentro de su rango de alcance. La forma de abordar este problema puede ser desde la perspectiva planteada en [5], en el cual se propone un modelo numérico para evaluar dicho desempeño, o basados en simulaciones de eventos discretos como los mostrados en [8]. El tener un modelo para poder evaluar dicha calidad, dependerá del tipo específico de aplicación que se quiera estudiar, para así poder acotar la gran cantidad de aplicaciones existentes y proponer mejoras al desempeño de éstas.

Existen diversas investigaciones que abordan este tema, en [9] se presenta un estudio en el cual la degradación de la calidad de un flujo de video MPEG4 se ve afectada por la pérdida de paquetes en la red durante su transmisión. En este estudio, los autores se enfocan en proponer un modelo analítico que explique los efectos de la pérdida de paquetes en la calidad del flujo de video y evaluarlo por medio de simulaciones.

En [10], se presenta un mecanismo de calidad de servicio en redes 802.11 para tráfico de VoIP, proponiendo una solución práctica de la configuración de los parámetros de operación de los puntos de acceso de una red de área local, incrementando la calidad del enlace, con esto mejoran la transmisión de datos multimedia, en este caso en particular se estudia la transmisión de VoIP. Esta propuesta se evalúa por medio de simulaciones, realizadas en el simulador de redes NS-2. Los resultados de trabajos como [10] se reportan en términos de parámetros objetivos como tasas de transmisión de datos, retardos, cantidad de paquetes perdidos, entre otros, demostrando así, de qué manera se afecta a las aplicaciones en curso.

4.4. Un nuevo enfoque para la reducción de los tiempos de latencia de handover en redes WLAN

Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el desempeño de una aplicación multimedia en tiempo real, midiendo los parámetros mencionados en los párrafos anteriores y obteniendo con ello la calidad de una transmisión de datos multimedia en términos objetivos. Otro de los objetivos ya mencionados, que se encuentra dentro de los parámetros de alcance de este trabajo de investigación, es una propuesta de extensión al protocolo de handover en redes inalámbricas de área local, para reducir los tiempos de latencia de handover. Esta propuesta se explica dentro de los párrafos siguientes.

4.4.1. Descripción de la propuesta

En este apartado, se describe una nueva forma de reducir los tiempos de latencia de handover de capa MAC, mediante la incorporación de parámetros que ayuden a los nodos en la toma de decisión, y a conocer el AP al cual emigrará, o al menos, conocer una de las mejores opciones antes de que se presente un estado de desconexión, pretendiendo que el nodo tome una decisión sin necesidad de enviar una petición de *request* a todos los AP que

tenga a su alcance, reduciendo con ello el tiempo que toma en decidir el nuevo AP al cual se conectará. Se necesita tomar en cuenta dos parámetros importantes para poder utilizar este enfoque.

- **La probabilidad de handover.** La probabilidad de que un nodo cambie de AP al cual se encuentra conectado, es decir, la probabilidad de que se presente un evento de handover. Esta probabilidad, está dada por :
 - **El tiempo que permanece un nodo móvil asociado a un punto de acceso.** La propuesta hace la incorporación de este parámetro, para obtener un handover proactivo, es decir, que el nodo después de estar asociado cierto tiempo a un mismo AP, obtendrá la probabilidad que existe de que se realice un evento de handover. Para ello, se establece un valor de umbral, este valor cambiará en función del escenario en el que se encuentre el nodo móvil, es decir, el valor de dicho umbral de tiempo dependiendo de la cantidad de AP que estén en el rango de alcance del nodo móvil. Los valores que se toman en cuenta como parámetros, son los registrados en la literatura, dichos valores podemos encontrarlos en trabajos como [26].

El proceso que seguirá el nodo móvil es el siguiente:

1. Cada t tiempo, escanea el ambiente para detectar los AP y sus canales disponibles.
2. Crea una lista de AP de la WLAN a la que esté conectado.
3. El nodo móvil obtendrá la lista de APs dentro de su rango. La cual actualizará cada t tiempo.
4. Obtendrá la probabilidad de HO, y tomando en cuenta el tiempo que tiene asociado a su actual punto de acceso, entre mayor sea dicho tiempo, es más probable que suceda un evento de handover.
5. El nodo móvil realizará el traspaso de red cuando su tiempo de residencia asociado se aproxime al tiempo promedio de permanencia en una celda.
6. Cuando el tiempo promedio sea mayor, el nodo móvil empezará el proceso de traspaso de red, para lo cual, éste enviará directamente la petición *request* al AP que se encuentre en el primer sitio de su lista. Cuando el AP no le responda, tendrá la posibilidad de realizar el HO hacia el segundo en la lista.

Para detallar esta serie de tareas que descritas de manera generalizada, se redacta el Algoritmo 2 para realizar la comparativa entre dos algoritmos diferentes, el Algoritmo 1, es decir el original del proceso de handover y el Algoritmo 2 que describe la propuesta de modificación al algoritmo original.

Algoritmo 1 Principales tareas del protocolo de handover para IEEE 802.11

Entrada: Nodo móvil conectado

```
1: mientras HO no realizado || timer expiró hacer
2:   Escaneo del medio ( $n$  = número de APs detectados)
3:   Envía  $n$  mensajes de prueba a los APs detectados
4:   si (selecciondeAP == verdadero) entonces
5:     NM envía petición de autenticación AP elegido
6:     si NM recibe confirmación de autenticación entonces
7:       NM se asocia con el AP
8:       devolver HO realizado
9:     si no
10:      NM envía mensaje de prueba a los AP detectados
11:      si NM recibe confirmación de autenticación entonces
12:        NM se asocia con el AP
13:        devolver HO realizado
14:      si no
15:        Escaneo del medio
16:      fin si
17:    fin si
18:  si no
19:    Escaneo del medio
20:  fin si
21: fin mientras
22: devolver HO realizado
```

Algoritmo 2 Extensión del protocolo de handover para IEEE 802.11

Entrada: Nodo móvil conectado

- 1: **mientras** HO no realizado || *timer* expiró **hacer**
 - 2: Escaneo del medio. Cada t tiempo, el NM monitorea el ambiente para detectar los AP y sus canales disponibles.
 - 3: Crea una lista de los AP de la WLAN a la que esta conectado.
 - 4: NM actualiza su lista de APs dentro de su rango. Cada t tiempo.
 - 5: **si** ($P_{HO} \geq 0,5$)&&($T_R \geq Umbral$) **entonces**
 - 6: NM envía petición de autenticación al primer AP de su lista
 - 7: **si** NM recibe confirmación de autenticación **entonces**
 - 8: NM se asocia con el AP
 - 9: **devolver** HO realizado
 - 10: **si no**
 - 11: NM envía petición de autenticación al segundo AP de la lista
 - 12: **si** NM recibe confirmación de autenticación **entonces**
 - 13: NM se asocia con el AP
 - 14: **devolver** HO realizado
 - 15: **si no**
 - 16: Escaneo del medio
 - 17: **fin si**
 - 18: **fin si**
 - 19: **si no**
 - 20: Escaneo del medio
 - 21: **fin si**
 - 22: **fin mientras**
 - 23: **devolver** HO realizado
-

Para ilustrar los pasos del Algoritmo 2 descrito en el párrafo anterior se presenta la Figura 4.2 en donde se muestra la serie de tareas realizadas por el nodo móvil antes de iniciar un evento de handover.

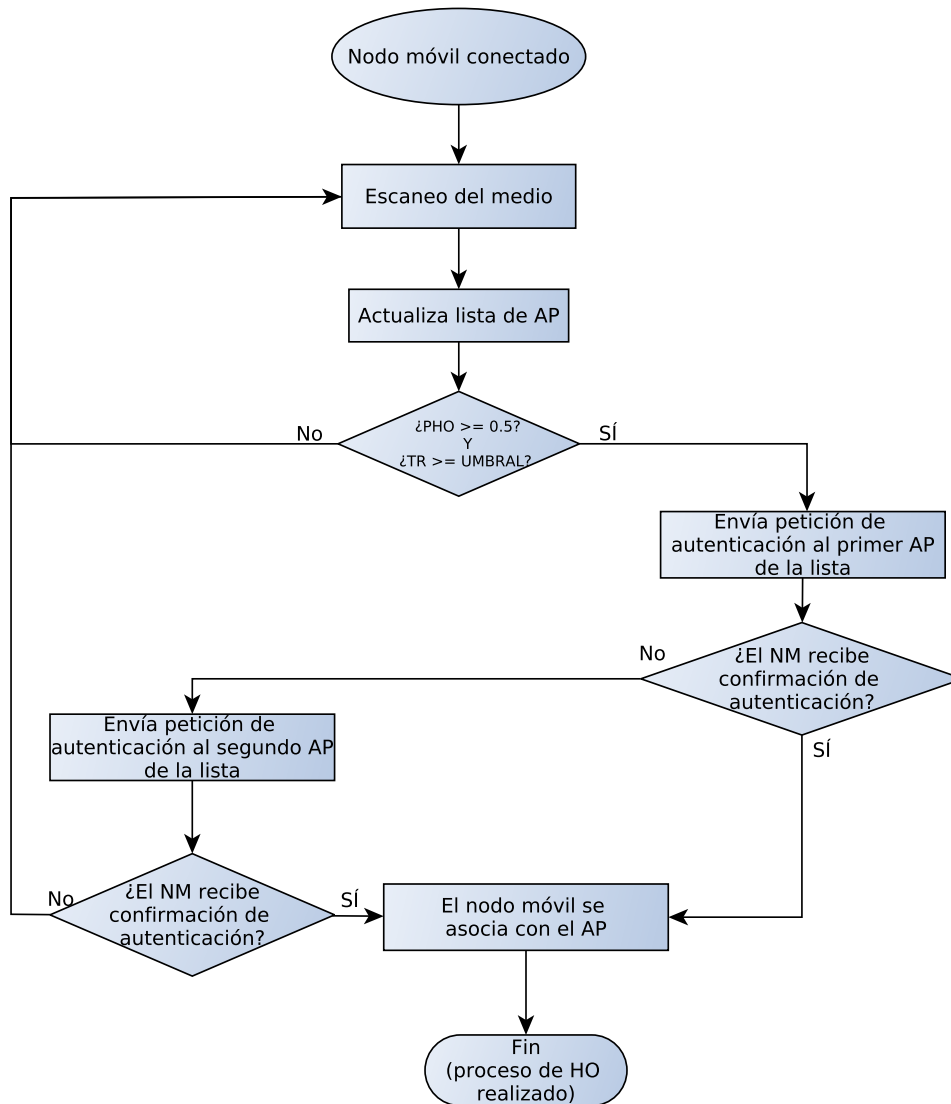


Figura 4.2: Algoritmo para la reducción de la latencia durante un HO.

Evaluación de desempeño

La caracterización de la calidad de una aplicación multimedia en tiempo real, como se describe en el capítulo anterior, puede realizarse de distintas maneras, en nuestro caso, toda la evaluación de desempeño se realiza con medidas objetivas de la calidad de una transmisión. En este capítulo se presentan los parámetros de evaluación utilizados para medir el desempeño de una transmisión de video en una red WLAN, ya sea en formato MPEG4 o H.264, que son dos de los formatos más utilizados dentro de las aplicaciones multimedia. Estos parámetros son los siguientes.

5.1. Medidas de desempeño

- **Número de paquetes perdidos.** La medición de este parámetro nos da un panorama de la calidad de la aplicación en ejecución, para caracterizar el desempeño de la red.
- **Retardo de extremo a extremo.** El registro del tiempo de emisión de cada uno de los paquetes enviados y el registro del tiempo de llegada de cada paquete recibido nos permite calcular el tiempo promedio que tardan en llegar un paquete desde el emisor hasta el receptor, tomando esta medida como parámetro de desempeño.
- **Latencia de handover.** Es el tiempo total en que un nodo móvil se encuentra desconectado de la red, es decir, durante ese periodo de tiempo el nodo móvil que está llevando a cabo el handover no recibe ni envía paquetes. Para el caso de handover horizontal, en una red WLAN, se considera desde el momento en el que el nodo envía un paquete de *requisición de AP*, es decir, avisa si existe un AP disponible y con mayor potencia de señal del cual el nodo móvil se encuentra conectado, si recibe alguna respuesta favorable por parte del AP, en ese momento se inicia el proceso de traspaso, hasta que el nodo móvil vuelve a enviar o recibir paquetes.
- **Velocidad efectiva de transmisión (tramas/segundo).** Medición de la cantidad de paquetes enviados por segundo.

- **PSNR.** El PSNR del inglés *Peak Signal-to-Noise Ratio* del video recibido, indica la relación de similitud entre el conjunto de imágenes enviadas y recibidas en un video. Se utiliza para comprobar cuadro por cuadro la información enviada con la recibida.
- **Número de eventos de handover realizados.** La medición del número promedio de eventos de handover que un nodo móvil realiza durante una transmisión de video, es un parámetro también considerado para medir el efecto que causa el número de eventos de éstos traspasos; teniendo como premisa que la realización de eventos de handover innecesarios afecta la calidad de la aplicación [5].

Los resultados obtenidos que se reportan en este trabajo son: porcentaje de paquetes perdidos, latencia de handover y retardos de extremo a extremo. Considerando que estos parámetros son los más significativos para este análisis. Dichas medidas se obtuvieron para cada uno de los escenarios propuestos, con las diferentes variaciones a cada uno de ellos, logrando con esto, la caracterización de las aplicaciones utilizadas en este trabajo. También se obtuvieron resultados cuando se variaron diversos parámetros en los escenarios de simulación, observando el desempeño de cada aplicación y de cada escenario.

Para poder obtener estos resultados, utilizamos un conjunto de herramientas de análisis descritas a detalle en los siguientes párrafos; la más importante, el uso de un simulador de redes y la incorporación al simulador de una herramienta que nos permite generar flujos de video e incluirlos en los escenarios dentro del simulador de redes, además de los programas diseñados para el análisis de desempeño, es decir, la parte de procesamiento de los resultados que se obtienen de las simulaciones, dejando con esto un marco completo para el estudio de flujos de video sobre redes WLAN.

5.2. Herramientas de simulación

En esta investigación utilizamos algunas herramientas de simulación poder alcanzar los objetivos planteados al inicio de este trabajo, a continuación realizamos una descripción breve de cada una de ellas.

5.2.1. Simulador de redes

Una vez elegidos los parámetros a medir, se realiza una investigación del software y las herramientas necesarias para la realización de los objetivos planteados en los párrafos anteriores. Se elige como método de estudio, la simulación de eventos discretos por medio de la utilización del simulador de redes *Network Simulator NS-2* [15]. Este simulador de redes brinda las utilidades necesarias ya que cuenta con un soporte de librerías para la simulación de redes inalámbricas 802.11 en modo infraestructura, las cuales se necesitan para este estudio. La mayoría de sus rutinas están escritas en el lenguaje de programación C++, y bajo licencia GPL, dando la ventaja de realizar cualquier modificación al código

fuente del simulador, adaptándolo puntualmente para poder resolver el problema de estudio planteado en este trabajo, adecuando el simulador a nuestros propósitos; además de ser un simulador respaldado por la comunidad científica y utilizado en la mayoría de los trabajos de investigación en esta área del conocimiento, por su robustez y disponibilidad para toda la comunidad.

5.2.2. Evalvid

El simulador NS-2 brinda soporte para las redes inalámbricas 802.11, sin embargo los modelos generadores de tráfico con los que cuenta no satisfacen las necesidades para este trabajo, debido a que no proporciona generadores de flujos MPEG4 o H.264 [11], los cuales son los tipos de datos analizados a lo largo de esta investigación.

Para solucionar la inclusión de tráfico multimedia dentro del simulador, se decide hacer uso de una herramienta que proporciona el soporte necesario para poder obtener tramas reales de flujos de video en formato MPEG4 y H.264, dicha herramienta es Evalvid [16].

Evalvid es un *marco de referencia* y un conjunto de herramientas para la evaluación de la calidad de flujos de video transmitidos a través de una de red de comunicaciones, puede utilizarse en ambientes simulados o reales. Esta herramienta es utilizada en este trabajo para crear las trazas de video que se envían como tráfico a través de los escenarios durante el proceso de simulación.

Evalvid está diseñada para poder integrarse al simulador NS-2, obteniendo por medio de simulaciones y trazas reales de video, un escenario que permite el tratamiento de datos multimedia en conjunto con las ventajas de un simulador de redes como el NS-2. La integración de Evalvid con NS-2, se realiza en la versión 2.34 de NS-2, ya que versiones anteriores a esta no dan soporte para redes 802.11 tipo infraestructura. La elección de los videos con codificación MPEG4, se realiza de una lista¹ de videos en este formato que se encuentran disponibles para la comunidad. Un ejemplo de cómo integrar Evalvid con el simulador NS-2, se puede encontrar en [17], en donde los autores explican el funcionamiento de dicha herramienta y la forma en la cual se puede incorporar tanto a un escenario planteado en NS-2, como a un escenario real. En la Figura 5.1 se puede observar un diagrama de lo que se utiliza para la realización de la primera parte de este trabajo, en donde se incluye la herramienta Evalvid al simulador de redes elegido y a los escenarios propuestos descritos en la sección siguiente, teniendo como resultados de la simulación diversos archivos, uno de ellos con las trazas propias del simulador, otros con los datos del número de tramas recibidas y después de un proceso de depuración de estos se obtienen los tiempos de handover necesarios para este trabajo, además de la obtención de un archivo con las etiquetas de tiempo en el cual se registra el instante en el que cada trama es enviada y recibida.

En la sección de resultados, se detalla cómo se utiliza cada uno de estos archivos para la obtención de los resultados finales de las simulaciones, cuando se tienen incorporadas todas

¹Existen diferentes videos y formatos disponibles para descarga en el siguiente sitio <http://media.xiph.org/video/derf/>

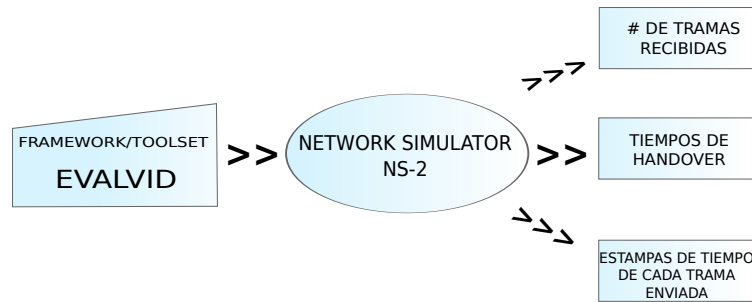


Figura 5.1: Archivos generados por Evalvid

las herramientas utilizadas en el desarrollo de esta investigación. Se explican los detalles de los archivos obtenidos mediante Evalvid y cómo se incorporan a los programas de procesamiento de los datos obtenidos, para lograr obtener resultados, que son básicamente, las medidas de desempeño planteadas en las secciones anteriores de este capítulo.

5.2.3. Patrones de movilidad de los nodos

Una parte importante de la caracterización de nuestros escenarios es, dotar de un patrón de movilidad a los nodos inalámbricos, es decir, a los usuarios de una WLAN, permitiendo con ello, que las simulaciones se adapten a un ambiente en donde los usuarios tienen necesidad de desplazarse a puntos diferentes dentro de la misma red.

Uno de los objetivos de este trabajo es medir el tiempo de duración de un evento de handover, para ello se asigna a los nodos móviles un patrón de movimiento que permita, durante el desarrollo de la simulación, que éstos cambien de punto de acceso debido a su trayectoria móvil, obteniendo así mediciones del tiempo promedio que tarda el nodo móvil en cambiar de punto de acceso, es decir, los tiempos promedio de duración de la latencia de handover.

La elección de un patrón de movimiento constituye una tarea importante, ya que, dependiendo del modelo elegido, los resultados de las simulaciones del experimento estudiado pueden variar. Por este motivo, el modelado del movimiento de los usuarios juega un papel significativo en el análisis de protocolos o algoritmos dentro de una WLAN [30].

Sin embargo, la inclusión de patrones de movimiento no siempre es realizada en trabajos similares; no es el caso en el artículo [21], en donde los autores proporcionan movimiento a los nodos inalámbricos, dotando de un archivo de movilidad independiente para cada nodo que aparece en la simulación. Ellos utilizan distintos modelos de movimiento dentro de sus simulaciones. Los resultados de su trabajo se presentan para cada patrón utilizado en cada escenario, con el afán de ver los cambios en los resultados de la simulación de algún problema específico, cuando se elige un diferente patrón de movimiento.

La movilidad de los nodos se puede clasificar en macroscópica y microscópica, refiriéndose a macroscópica, cuando se estudia el comportamiento en grupo de distintos nodos móviles,

y en microscópica, cuando se dota a cada nodo en particular de un patrón de movilidad sin que este se vea afectado por la presencia de otros nodos. En esta investigación, se estudia la movilidad de cada nodo como un elemento independiente, y no como un conjunto de nodos. En otras palabras, cada nodo móvil en los escenarios de movilidad estudiados, cuenta con un archivo de movimiento que le indica en cada instante de tiempo de la simulación, el lugar en el que se encuentra y la velocidad a la cual se desplaza, independientemente de cómo se desplacen los nodos vecinos presentes en su mismo escenario de red.

La obtención de patrones de movimiento puede realizarse con herramientas externas al simulador o proporcionadas por el mismo NS-2, el cual cuenta con este tipo de utilidades, esta herramienta es llamada *setdest*, la cual crea de manera pseudoaleatoria trayectorias de recorrido del nodo, permitiendo configurar los parámetros que más se acoplen a la simulación, algunos de estos parámetros son: las dimensiones en metros del escenario, la velocidad de desplazamiento de los nodos en metros por segundo, y el tiempo total que dura la simulación. El patrón de movilidad que utiliza *setdest* por defecto, es *Random Waypoint*, descrito en los siguientes párrafos al igual que el resto de los patrones utilizados en este trabajo.

La obtención de estos patrones se realiza por medio de una herramienta externa a NS-2, ésta es *Bonn Motion* [28], desarrollada por el grupo de Sistemas de Comunicación en el Instituto de Ciencias de la Computación de la Universidad de Bonn, Alemania. Creada con el propósito de proporcionar una herramienta para las investigaciones en redes móviles. *BonnMotion* proporciona la opción de elegir entre distintos patrones de movimiento, además, tiene la capacidad de poder exportar los escenarios creados con *BonnMotion* a archivos de movimiento con formato para ser insertados en distintos simuladores de redes, como lo son NS-2, NS-3, GloMoSim/QualNet, entre otros. Los modelos utilizados son los siguientes:

- **Random Waypoint Mobility Model.** RWMM, por su acrónimo en inglés. Este modelo es comúnmente utilizado en simulaciones de redes inalámbricas, es un modelo simple y fácil de simular. Sin embargo, según Le Boudec y M. Vojnovic en su trabajo [27], el RWMM es un modelo que presenta cambios bruscos en las trayectorias de los nodos móviles, por lo que ha venido sufriendo algunas modificaciones para evitar esto, ayudando con ello a representar mejor la trayectoria que un usuario presentaría en un escenario real. Los mismos autores presentan en su artículo, una implementación de las modificaciones que le realizaron al algoritmo. Existen distintas herramientas que permiten la simulación de este modelo, incluyendo al simulador NS-2, sin embargo, en este trabajo se implementa este algoritmo, por medio de la herramienta Bonn Motion [28].
- **Brownian Motion Mobility Model.** BMMM. Este modelo es llamado también Random Walk Mobility Model, fue desarrollado para imitar el movimiento errático que tienen diversas entidades en la naturaleza. El NM se desplaza en una dirección y velocidad constantes, tomada aleatoriamente de entre un rango predefinido de velocidad y dirección; después de que se viaja una distancia d , el nodo vuelve a tomar la decisión de velocidad y dirección para su nuevo trayecto. En este modelo, el NM siempre alcanza los límites determinados en la simulación, al llegar al borde del escenario, este toma una nueva dirección para desplazarse. Este modelo contiene distintas modificaciones,

una de ellas es el mencionado RWMM. La principal diferencia entre ambos es, que en el RWMM, los nodos móviles tienden a agruparse en el centro de área de simulación [31].

- **Random Direction Mobility Model.** RDMM, la particularidad de este modelo, es que el nodo se desplaza en una dirección y a una velocidad aleatorias (dentro de los parámetros establecidos) hasta el borde del escenario dado, es ahí cuando realiza una pausa, y continúa su trayectoria móvil, hasta consumir el tiempo establecido para la simulación.
- **Gauss-Markov Mobility Model.** La diferencia de este modelo, en comparación con los anteriores, es que cuenta con un parámetro que ajusta diversos niveles de aleatoriedad, esto radica en que se asigna a cada nodo móvil una velocidad y dirección al inicio de la simulación y a intervalos fijos de tiempo se realiza un movimiento, actualizando la velocidad y dirección del NM, este valor es calculado por una serie de ecuaciones, que podemos ver descritas a detalle en el trabajo [31].

Los tres primeros modelos mencionados, son utilizados en [21], en donde los autores proponen utilizar estos diferentes patrones de movilidad para poner sus resultados en un marco más confiable, sin decidirse por uno solo como la mayoría de estudios cuyo tema principal no es la comparación de los patrones de movimiento, sino tomando estos como complemento a su trabajo de investigación.

El último patrón de movimiento, el Gauss-Markov, se eligió debido a que los autores describen que su modelo simula un movimiento más apegado a la realidad por encima de otros modelos [31], debido a que elimina los giros bruscos y las pausas repentinas en la trayectoria del nodo móvil; este permite que la velocidad y dirección en un tiempo pasado influya en el movimiento y velocidad futura del nodo. Así, el modelo basa cada uno de sus movimientos por la velocidad y dirección que tiene el nodo en el presente y por movimientos pasados. La influencia de éstos, permite que el modelo disminuya los movimientos bruscos en las trayectorias del móvil.

5.3. Escenarios propuestos

El objetivo de proponer escenarios, es contar con un marco que permita obtener de manera objetiva resultados dentro de un contexto como el de este trabajo, primeramente, proponer un escenario en un simulador robusto implica una ventaja, y contar con herramientas que complementan dicho ambiente, como Evalvid, son cuestiones ya probadas por la comunidad de investigadores en el tema. Se eligen para ello tres escenarios, basándonos en los propuestos en la literatura, para poder poner en contexto nuestros resultados, con los de trabajos similares.

- *Escenario 1.* El primer escenario consta de cuatro puntos de acceso conectados a un switch, y dos nodos móviles intercambiando un flujo de video MPEG4, este es el más simple de los escenarios que nos sirve para poder obtener resultados que comprueban

que el simulador y las herramientas externas utilizadas durante la simulación, como los son Evalvid y el generador de patrones de movimiento para los nodos, se encuentran acoplados y funcionando correctamente, además se obtienen mediciones de los parámetros de desempeño en un escenario en el cual no existe otro tipo de flujos de datos, es decir, no se ponen a competir las tramas de video por los recursos de la red; para poder comparar estos con los resultados de escenarios más completos, es decir que además de el nodo emisor y receptor del video enviado, existe en la red otro tráfico diferente al multimedia y así poder medir las diferencias en la calidad de la aplicación desarrollada. La Figura 5.2 muestra gráficamente la ubicación de los nodos y el escenario completo utilizado en la simulación. En resumen, este primer escenario es un *ambiente ideal*, o, el *mejor caso* debido a que existen solo dos nodos transmitiendo; quitando con ello los problemas que surgen cuando existen más entidades dentro de la misma red, las cuales podrían generar más tráfico, contención por el medio, o incluso crear un ambiente de saturación de la red en donde los puntos de acceso fueran insuficientes para atender la demanda de usuarios.

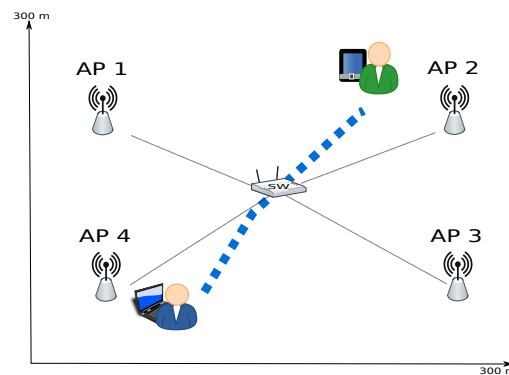


Figura 5.2: Escenario 1: Cuatro APs y dos nodos móviles.

- *Escenario 2.* Este segundo escenario, es una ampliación al escenario 1, al cual se le agregan dos nodos móviles más, los cuales se encuentran intercambiando archivos, pero no tráfico multimedia, sino que se envía una tasa constante de información, simplemente para crear más tráfico, y empezar a aproximar a un escenario en el que existan distintos usuarios intercambiando tráfico de video o datos simples como tráfico CBR (Constant Bit Rate). En este escenario, cada NM está dotado también con su patrón de movilidad. Así que, de forma general, podemos describir este escenario, como cuatro nodos móviles conviviendo en un escenario de límites establecidos, cada uno independiente a los demás en su movimiento. La evaluación de la calidad del video, se realiza también, sólo sobre la transmisión de los dos nodos que están intercambiando datos multimedia.
- *Escenario 3.* Por último, el escenario 3, propone un ambiente en el que conviven 50 nodos móviles, todos ellos con actividad dentro de la WLAN; se considera que algunos de ellos, se encuentran estáticos y algunos se encuentran sin transmitir. Se trabaja en

este escenario, para ver el desempeño de las aplicaciones, cuando se tiene mayor presencia de usuarios dentro de una misma red, algunos también transmitirán aplicaciones multimedia. Sin embargo la evaluación de desempeño sólo se realizará sobre una sola transmisión, como en el escenario 1, en el que se mide la calidad de la aplicación en una transmisión multimedia entre dos usuarios móviles.

Se tiene ahora el marco de trabajo para la evaluación de una transmisión de video en una WLAN, que consiste en las herramientas que nos proporciona Evalvid para crear las tramas de video que se inyectan al escenario de simulación, el generador de patrones de movilidad independiente para cada uno de los nodos, creados con la herramienta BonnMotion, además de una serie de programas que nos permiten depurar la información dada por el simulador, obteniendo así las mediciones promedio del número de eventos de handover realizados, el retardo de extremo a extremo, los tiempos de latencia, número promedio de paquetes perdidos, y la velocidad efectiva de transmisión y la latencia promedio de un evento de handover.

Desempeño del protocolo de handover en redes IEEE 802.11

En este capítulo recopilamos la información obtenida al realizar la evaluación de desempeño descrita en el capítulo anterior en los escenarios planteados. La evaluación se realiza con la versión *b* del protocolo 802.11, como se describe en los párrafos posteriores. Los protocolos evaluados son los que soporta actualmente la versión 2.34 del simulador NS-2.

El marco de evaluación creado para poder cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, nos permite obtener medidas de desempeño objetivas durante la transmisión de aplicaciones multimedia, aprovechando las ventajas de distintas herramientas descritas en el capítulo anterior, lo cual, como se ha descrito a lo largo de este trabajo, corresponde al objetivo principal de este.

6.1. Protocolos evaluados

En este trabajo nos enfocamos en las versiones del protocolo 802.11 para dispositivos inalámbricos con esta interfaz, las versiones IEEE 802.11 b y g. El simulador NS-2 utiliza por defecto la versión b del 802.11. Las características que ofrece este simulador de redes que la diferencian de las versiones anteriores son: su velocidad de transmisión de hasta 11 Mbps, y su banda de transmisión en los 2.4 GHz [13].

6.1.1. Escenario 1

Los parámetros para el escenario 1 los podemos encontrar en la Tabla 6.1.

Parámetros	Valor
Vel. máx. de los NMs	2 m/s
Versión de 802.11	b
Número de nodos móviles	2
Tipo de datos enviados	MPEG4
Modelo de movilidad	RWMM
Puntos de acceso de la WLAN	4

Tabla 6.1: Parámetros de simulación para el escenario 1.

Parámetros	Valor
Vel. máx. de los NMs	2 m/s
Versión de 802.11	b
Número de nodos móviles	4
Tipo de datos enviados	MPEG4
Modelo de movilidad	RWMM
Puntos de acceso de la WLAN	4

Tabla 6.2: Parámetros de simulación para el escenario 2.

6.1.2. Escenario 2

El número total de nodos móviles es 4. Los parámetros los encontramos en la Tabla 6.2, en este escenario los cuatro nodos móviles se encuentran transmitiendo video MPEG4. La duración de la simulación varía dependiendo el contenido que se transmita, es decir, la simulación finaliza cuando el nodo emisor termina de transmitir y el nodo destino ha recibido toda la información.

6.1.3. Escenario 3

El escenario 3 consta de 50 nodos móviles en una WLAN con cuatro puntos de acceso, la cantidad de nodos respecto a los escenarios anteriores se incrementa drásticamente con el fin de cubrir distintos ambientes. Los resultados obtenidos en este escenario, varían respecto a los dos anteriores debido a que existen más nodos dentro de la red, los cuales contienen por los recursos de ésta. Los parámetros principales para este escenario los podemos ver en la Tabla 6.3.

Parámetros	Valor
Vel. máx. de los NMs	2 m/s
Versión de 802.11	b
Número de nodos móviles	50
Tipo de datos enviados	MPEG4
Modelo de movilidad	RWMM
Puntos de acceso de la WLAN	4

Tabla 6.3: Parámetros de simulación para el escenario 3.

6.1.4. Resultados

En la Figura 6.1, podemos observar los valores promedio del tiempo de latencia obtenidos para cada uno de los diferentes modelos de movilidad para el escenario 1. En ella, observamos que todos los valores promedio se encuentran en el rango de los 0.2 a los 0.4 segundos, esto quiere decir que se encuentran dentro de los promedios establecidos en los estándares. Con ello, comprobamos que nuestros escenarios y nuestro marco de pruebas se encuentra funcionando correctamente, logrando en este caso particular obtener eventos de handover con muy bajos promedios de duración, debido principalmente a que no se presenta ningún otro nodo intentando transmitir u ocupando los mismos recursos de red. Además, es necesario mencionar que las pérdidas ocurridas son debido a la naturaleza de una transmisión por medios inalámbricos, la cual no está exenta de presentar pérdida de paquetes.

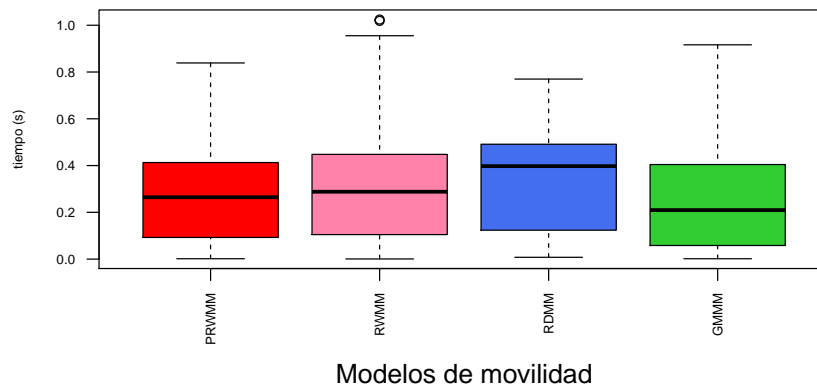


Figura 6.1: Tiempos de latencia del escenario 1.

La comparación de los valores promedio de latencia en los primeros dos escenarios podemos observarla en la Figura 6.2. El análisis de estos valores lo complementamos con las gráficas restantes, ya que el tiempo promedio de handover lo relacionamos directamente con las gráficas de pérdida de paquetes y de los retardos de extremo a extremo; consiguiendo con ello un análisis de resultados más completo de los tres escenarios de simulación. Los valores promedio de latencia obtenidos en los tres escenarios de simulación, se presentan en la Figura 6.3, en donde se registran tiempos de duración muy elevados en algunos eventos de handover registrados en el escenario 3, sin embargo, el promedio total de los valores registrados en todas las simulaciones no varía en gran cantidad respecto a los dos primeros, con estas pequeñas variaciones el nivel de pérdidas registrado durante la transmisión del video, se incrementa drásticamente. Esto lo registramos en la Figura 6.4, en ella se registra un incremento significativo para los escenarios en donde los tiempos de latencia son mayores.

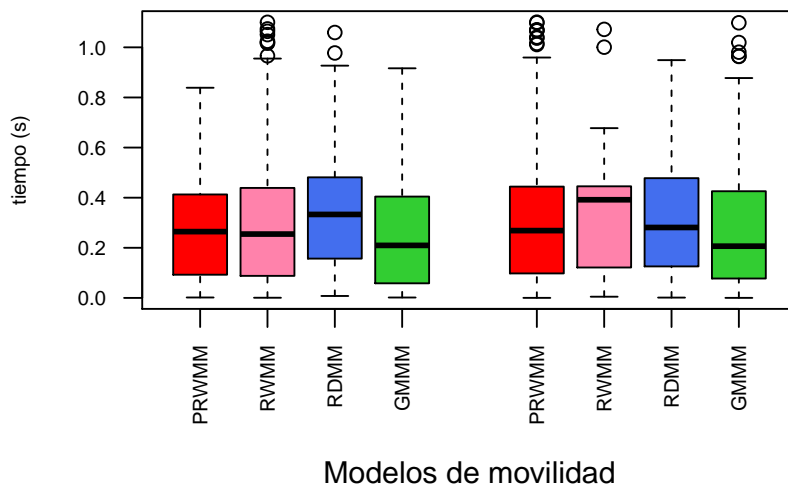


Figura 6.2: Tiempos de latencia del escenario 1 y 2.

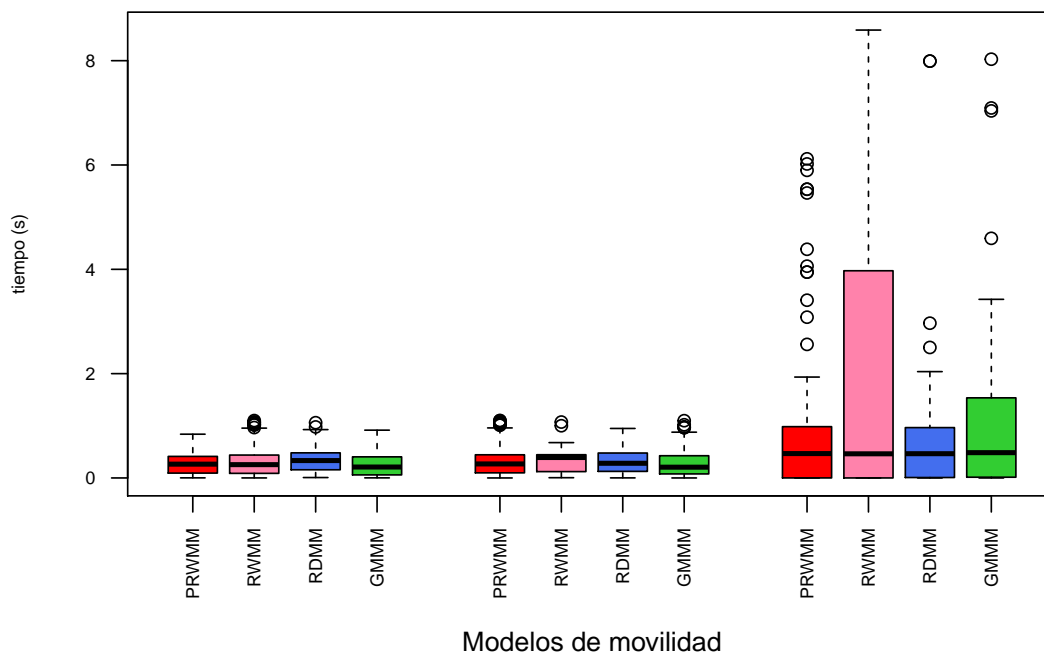


Figura 6.3: Tiempos de latencia de los tres escenarios.

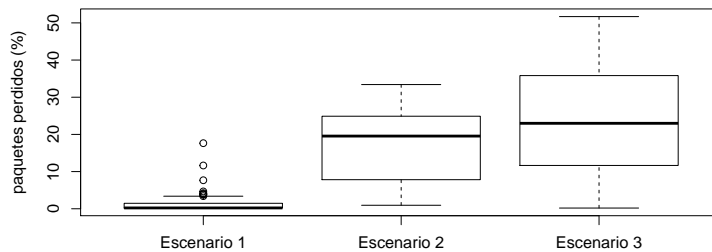


Figura 6.4: Porcentaje total de paquetes perdidos.

Por último, en la Figura 6.5 registramos los retardos de extremo a extremo medidos en el escenario 2 y 3. En esta Figura podemos ver que algunas mediciones alcanzan el valor de más de 5 segundos, en dichos casos, son los que aumentaron significativamente el valor promedio de pérdida de paquetes durante la transmisión. En esta gráfica no se incluye el escenario 1 debido a que no mostraba ninguna variación significativa, además de que los tiempos eran pequeños en comparación con los otros dos escenarios. Las mediciones registradas de este parámetro, se reportan en términos de paquetes y el total de tiempo que tardó cada una de estos en ser entregados; estos paquetes son los generados por la herramienta Evalvid, su máximo tamaño está configurado para 1024 bytes; la herramienta genera tramas que son divididas en paquetes de a lo más 1024 bytes.

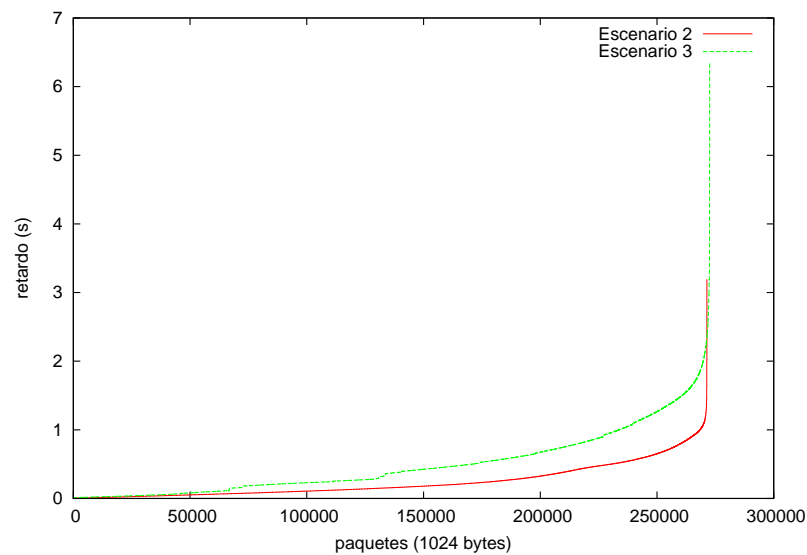


Figura 6.5: Retardo de extremo a extremo.

Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro

La disminución de la latencia de handover en redes inalámbricas de área local, representa una importante tarea para ayudar a mejorar la calidad de la comunicación, en especial cuando se transmiten datos multimedia. Como mencionamos a lo largo del desarrollo de este trabajo, existen diferentes campos desde donde abordar dicha problemática, en nuestro caso, desarrollamos un estudio de los efectos causados por la latencia de handover en redes inalámbricas de área local. Realizamos primeramente un estudio del estado del arte de mecanismos de handover en redes WLAN, con el fin de poner en contexto el planteamiento de nuestro trabajo, posteriormente desarrollamos un marco de evaluación que incluye un escenario de simulación dentro del simulador de redes NS-2, inclusión de trazas de video reales las cuales se transmiten de un nodo móvil a otro dentro de la misma red, además de asignar patrones de movimiento a cada uno de los nodos de la simulación para que pudieran cambiar de punto de acceso y con ello medir el tiempo que tardan en realizar el traspaso de red. Con el desarrollo alcanzado de este trabajo, se tiene el conjunto de herramientas para la evaluación de flujos de video en una red WLAN, dentro del simulador NS-2 y con la inclusión de distintos modelos de movilidad para los nodos inalámbricos presentes en la simulación. Además de poder obtener medidas de desempeño como latencia promedio total, retardos de extremo a extremo y valores promedio de las pérdidas registradas en los eventos de simulación. Las mediciones realizadas en nuestro marco de evaluación indican el pobre desempeño de los mecanismos de handover utilizados actualmente por el estándar 802.11 en presencia de tráfico multimedia y la necesidad de poder reducir el tiempo promedio de latencia de un evento de handover, considerando que impacta directamente con la calidad de la aplicación transmitida. Además observamos la problemática que surge cuando existe presencia de múltiples dispositivos dentro de la misma red, debido a que influye directamente en el desempeño de las aplicaciones. En conjunto, la presencia de tráfico multimedia en una WLAN, no es una tarea sencilla, o que se pueda estudiar aisladamente. La inclusión de patrones de movimiento en los nodos, nos deja ver que es significativo el cambio que sufren los resultados cuando se comparan en base al patrón de movilidad utilizado. Por lo que consideramos también, que

en trabajos futuros, la inclusión y el estudio de dichos modelos, es una tarea imprescindible. Contamos por lo tanto con un marco de referencia para la evaluación objetiva de aplicaciones multimedia en redes WLAN, ofreciendo la posibilidad de evaluar distintos escenarios que se acoplen a las particularidades de investigaciones en este tema.

Como trabajo futuro, pretendemos continuar con el estudio de mecanismos de handover en redes WLAN, implementando el mecanismo de reducción de latencias de handover presentado solo teóricamente en este escrito y la consiguiente comparación de su desempeño respecto a los mecanismos actuales. Considerando que es una tarea significativa el realizar un aporte que conlleve a mejorar el desempeño de la transmisión de aplicaciones multimedia en escenarios como los estudiados en este trabajo.

Referencias

- [1] Yongqiang Zhang, *Vertical Handoff between 802.11 and 802.16 Wireless Access Networks*, A thesis presented to the University of Waterloo Ontario Canada, 2008.
- [2] H. Schulzrinne, A. Rao, R. Lanphier, *Real Time Streaming Protocol (RTSP) IETF*, RFC 2326, Abril 1998.
- [3] Ian F. Akyildiz and Shantidev Mohanty, *A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems*, *Wireless Communications IEEE*, Agosto 2004, pp. 16-28.
- [4] Thavisak MANODHAM, Luis LOYOLA, Gustavo ATOCHE, Mitsuo HAYASAKA and Tetsuya MIKI, *A Novel Handover Scheme for Reducing Latency in WLANs*, *IEEE VTC*, Septiembre 2005, pp 1141-1144.
- [5] Alfonso Fernandez Duran, Raquel Perez Leal, Jose I. Alonso, *A Method to Estimate the Horizontal Handover Decision Effect on Indoor Wireless Conversational Video Quality*, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008.
- [6] JR. Damhuis, *Seamless handover within WiMAX and between WiMAX and WLAN*, 8th Twente Student Conference on IT, 2008.
- [7] Molina-Garcia, M. Duran, A.F. Leal, R.P. Alonso, J.I., *Method to Assess the Effect of the Horizontal Handover Decision on Voice Quality in Wireless Convergent Networks*, *European Conference on Wireless Technology*, Octubre 2008, pp. 226-229.
- [8] Yu-Chang Chen, Ja-Hsing Hsia, and Yi-Ju Liao, *Advanced seamless vertical handoff architecture for WiMAX and WiFi heterogeneous networks with QoS guarantees*, *Journal Computer Communications*, Febrero 2009, pp. 281-293.
- [9] Nick Feamster and Hari Balakrishnan, *Packet Loss Recovery for Streaming Video*, 12th International Packet Video Workshop, 2002.
- [10] Jengfarn Lee, Wanjiun Liao, Jie-Ming Chen, Hsiu-Hui Lee *A practical QoS solution to voice over IP in IEEE 802.11 WLANs*, *IEEE Communications Magazine*, Abril 2009, pp. 111-117.

-
- [11] ITU-T Recommendation H.264 *Infrastructure of audiovisual services Coding of moving video Advanced video coding for generic audiovisual services*, 2005.
- [12] Meriem Abid, Tara Ali Yahiya and Guy Pujolle, *On the Minimization of Handover Decision Instability in Wireless Local Area Networks*, International journal of Computer Networks & Communications, 2010.
- [13] IEEE 802.11 standard for information technology, *Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks*.
- [14] IEEE Standards Association, *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, Junio 2007.
- [15] The Network Simulator ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [16] J. Klaue, B. Rathke and A. Wolisz, *Evalvid a framework for video transmission and quality evaluation*, 13th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation, <http://www.tkn.tuberlin.de/menue/research/evalvid/>, Septiembre 2003.
- [17] Chin-Heng Ke, Ce-Kuen Shieh, Wen-Shyang Hwang and Artur Ziviani, *An evaluation framework for more realistic simulations of mpeg video transmission*, Journal Of Information Science And Engineering, Vol. 24, 2008, pp. 425-440.
- [18] Henning Schulzrinne, Steven Casner, R. Frederick and Van Jacobson, *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*, RFC 3550, Julio 2003.
- [19] Xiaohuan Yan, Y. Ahmet Sekercioglu, Sathya Narayanan, *A survey of vertical handover decision algorithms in Fourth Generation heterogeneous wireless networks*, Computer Networks, Febrero 2010, pp. 1848-1863.
- [20] Jerjees Z, Al-Raweshidy H.S., Raoof O., *Cross Layer Design to Improve the Handover Latency In Multi-homed WLANs*, GCC Conference & Exhibition IEEE, Marzo 2009.
- [21] Richard W. Pazzi, Zhenxia Zhang, Azzedine Boukerche, *Design and evaluation of a novel MAC layer handoff protocol for IEEE 802.11 wireless networks*, The Journal of Systems and Software 83, 2010, pp. 1364-1372.
- [22] Yogesh Ashok Powar, Varsha Apte, *Improving the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Latency to Support Multimedia Traffic*, WCNC 2009.
- [23] Zhenxia Zhang and Azzedine Boukerche, *Design and implementation of a novel MAC layer handoff protocol for IEEE 802.11 wireless networks*, IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing (IPDPS), Mayo 2009, pp. 1-5.
-

-
- [24] Zhenxia Zhang, Richard W. Pazzi, Azzedine Boukerche, *A fast MAC Layer Handoff Protocol for WiFi-Based Wireless Networks*, IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Octubre 2010, pp. 684-690.
- [25] Haitao Wu, Kun Tan, Yongguang Zhang, Qian Zhang, *Proactive Scan: Fast Handoff with Smart Triggers for 802.11 Wireless LAN*, IEEE INFOCOM 2007.
- [26] Zola E, Barcelo-Arroyo F, *Impact of mobility models on the cell residence time in WLAN networks*, Sarnoff Symposium 2009.
- [27] Jean-Yves Le Boudec, Milan Vojnović, *Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models*, IEEE INFOCOM, Marzo 2005.
- [28] BonnMotion. A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool, <http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/>
- [29] Oracle and affiliates, *System Administration Guide, IP Services*, http://docs.oracle.com/cd/E23823_01/pdf/816-4554.pdf, Agosto 2011.
- [30] Christian Bettstetter, *Smooth is Better than Sharp: A Random Mobility Model for Simulation of Wireless Networks*, ACM international workshop MSWIM, 2001, pp 19-27.
- [31] Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies, *A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research*, Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002, vol. 2, no.5, pp. 483-502.
- [32] Shashank Khanvilkar, Faisal Bashir, Dan Schonfeld, and Ashfaq Khokhar, *Multimedia Networks and Communication*, University of Illinois at Chicago, Chapter in Electrical Engineering Handbook, edited by W. K. Chen, Academic Press, pp. 401-425, 2004.
- [33] ITU-T Recommendation P.800.1, *Methods for objective and subjective assessment of quality*, Mean Opinion Score (MOS) terminology, 2006.
- [34] ITU-T Recommendation P.862.02, *Methods for objective and subjective assessment of quality*, Perceptual evaluation of speech quality (PESQ):An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs, 2001.
- [35] Ilango Purushothaman, Sumit Roy, *Infrastructure mode support for IEEE 802.11 implementation in NS-2*, Technical report, Fundamentals of Networking Lab, University of Washington, USA, 2007.
-

Apéndice

El simulador NS-2

Los simuladores de eventos discretos son una alternativa importante para la investigación en redes y comunicaciones. El NS-2 *Network Simulator* fue desarrollado por la Universidad de Berkeley en California y ocupa un lugar significativo en el campo de la investigación. Este simulador soporta tanto redes cableadas como inalámbricas y permite ajustar distintos parámetros que conllevan a la generación de escenarios robustos para el estudio de las comunicaciones, cuenta con protocolos de encaminamiento, de generación de tráfico como TCP y UDP, incorporación de modelos probabilísticos para las simulaciones, protocolos de capa de aplicación como FTP, incorporación de trazas de tráfico reales, patrones de movimiento para los nodos, entre muchas otras características.

El simulador está implementado en lenguaje OTcl y C++; OTcl sirve como intérprete de órdenes que el usuario programa al momento de crear sus escenarios de simulación, la implementación de todas las clases del simulador está escrita en el lenguaje C++, por lo tanto, cuando necesitamos realizar modificaciones e implementaciones de nuevos protocolos, se necesita modificar el código fuente escrito en C++ y anexar el nuevo módulo a los existentes para poder agregar nuevas funcionalidades al simulador. Esta ventaja se debe a que NS-2 está bajo una licencia GPL, la cual nos permite realizar modificaciones al código fuente proporcionado por los desarrolladores del simulador. En este apartado presentaremos las particularidades del simulador más sobresalientes que utilizamos en este trabajo.

A.1. Las redes inalámbricas en NS-2

En esta sección describimos los aspectos más importantes de la simulación de redes WLAN en NS-2 versión 2.34. Esta versión incorpora el modelo de redes WLAN tipo infraestructura que son las utilizadas en este trabajo. En la Figura A.1 podemos observar los principales elementos que componen un escenario de simulación básico, en donde se debe declarar el tipo de nodos utilizados, el canal inalámbrico y la forma en la que se transporta la información (protocolos de comunicación), así como el tipo de datos que se quiere enviar durante de la transmisión.

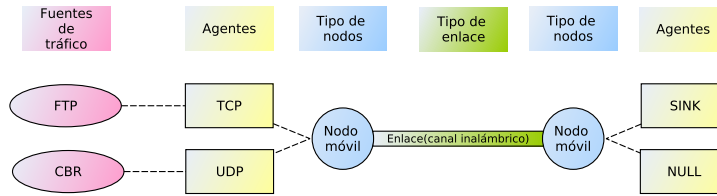


Figura A.1: Elementos principales de un modelo de red en NS-2.

El modelo 802.11 de NS-2 incorporó nuevas funcionalidades en la versión 2.34 [35], las cuales permiten configurar una WLAN en modo infraestructura, las principales características son:

- Beacon Frames. Un nodo puede ser configurado como punto de acceso con la siguiente instrucción: `$mac_(ap_node) ap [$mac_(ap_node) id]`, una vez que el nodo es configurado como AP, entonces empezará a transmitir *beacons*. Otra característica es la incorporación de un nuevo temporizador llamado **BeaconTimer** (configurable con la variable `BeaconInterval`), el cual puede ser configurado para definir las transmisiones periódicas de los *beacons*.
- Monitoreo activo y mensajes de prueba. Una vez que se configura en modo **activo** la forma en que un nodo monitorea el medio, este es capaz de enviar mensajes de prueba para solicitar la lista de AP disponibles dentro de su rango de alcance con un mensaje de broadcast (`sendPROBEREQ()`), con el cual todos los AP que hayan recibido el mensaje contestan al nodo con un mensaje `sendPROBEREP()` para declarar que están disponibles y dentro del rango del nodo.
- Autenticación y asociación. Cuando el nodo móvil tiene el AP con señal más fuerte, es capaz de enviar un mensaje de autenticación al AP al que va a migrar, para ello utiliza la función `sendAUTHENTICATE()`, el AP recibe el mensaje de solicitud de autenticación (`recvAUTHENTICATE()`) del nodo y envía un mensaje respondiendo al nodo con su BSSID y su dirección MAC, entonces cuando el AP recibe el acuse de que el nodo tiene la información, cambia su estatus a **authentication** para registrar que se realizó la autenticación, una vez realizado este procedimiento, se lleva a cabo la asociación, el nodo envía la solicitud de asociación (`sendASSOCREQ()`) al AP, una vez que el AP tiene el mensaje de acuse por parte del nodo móvil actualiza su lista de nodos a los cuales presta servicio.
- Soporte para movilidad. Esta funcionalidad en particular fue de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo, ya que permite que un nodo móvil cambie de AP al cual está conectado, es decir, proporciona la posibilidad de realizar un evento de handover. El procedimiento lo realiza a grandes rasgos de la siguiente manera: una vez que un evento de handover es detectado, el nodo monitorea de forma activa el medio y se

selecciona un nuevo AP para reasociarse con este; cuando el nodo termina de realizar su proceso de autenticación y reasociación al nuevo AP, los puntos de acceso, tanto el anterior como el nuevo AP al cual está asociado, cambian su lista de clientes para registrar los cambios realizados.

Análisis de los datos con AWK

El resultado de las simulaciones realizadas en NS-2 proporcionan distintos archivos de texto, los cuales se procesan para obtener los resultados finales del trabajo de investigación. La herramienta AWK proporciona utilidades importantes en el procesamiento de archivos de texto de grandes dimensiones; esta herramienta en conjunción con otras como GREP conforman potentes opciones para procesar datos. El programa principal utilizado es el siguiente:

Código fuente para obtener el tiempo de duración de un evento de handover

```
1: ns script.tcl > salida #se ejecuta el script de la simulacion en ns y se guarda la salida
2: grep -e "Client 4: Handoff Attempted" -e "Client 4: Rcv an Authenticate packet, Handoff from" -e "Client 4: Authenticated
= 1 Associated = 1" salida > handoffNODE5 #se analiza el tiempo en el que existe un posible handoff, el número 4 indica el nodo que se
está analizando, este puede variar dependiendo el escenario de simulación
3: awk '{ if ($4 ~ /Attempted/) print$6; if ($7 ~ /Handoff/)print $7}'handoff > tiempoHandoff
4: awk '{line[NR]= $1} END { for (i=1; i<=FNR;i++) {if(line[i+1]== "Handoff"){ print line[i]}}}'tiempoHandoff > tH #se registra
en un archivo(en este caso tH) el tiempo en que se inicia los eventos de handover que si se realizaron
5: count= $(wc -l tH | cut -d\ -f 1 ) #la variable count, cuenta el total de líneas del archivo tH, con ello obtenemos el total de eventos de
handoff que realizó el nodo analizado
6: awk -v count="$count" '{paquetes[NR]= $1} {startHO[NR]=$2} END{ for(i=1; i<=count;i++) { j=1; while(startHO[i] >
paquetes[j]){j++}; print paquetes[j];}'tiempoUDP > endHO #para obtener el tiempo final del evento de handoff, necesitamos el archivo
tiempoUDP, este se obtiene de la traza inicial de ns separando solo los paquetes UDP del nodo analizado
7: paste endHO tH > handoffFinal# este archivo consta de dos columnas, el inicio y fin de cada evento
8: awk '{print($1 - $2)}'handoffFinal > handoffFinal #se realiza la resta del tiempo final menos el inicial y en el archivo handoffFinal
registramos el tiempo que representan la latencia total del evento de handover
```

Este programa puede ser ejecutado desde un script Bash, anexando a la primer línea del archivo el texto: `#!/bin/bash`, y cambiando los permisos(`chmod u+x nombre_del_archivo`) del archivo para que se pueda ejecutar desde la terminal de UNIX, una vez realizado esto, basta ejecutarlo con la orden: `./nombre_del_Archivo`, cuando el programa termine su eje-

cución, se obtendrá un archivo de texto con los tiempos de latencia de un nodo del escenario de simulación. El programa puede extenderse para el análisis de otros nodos, el procedimiento se realizaría de forma similar a la anterior, agregándose en un solo archivo todos los tiempos obtenidos, es así como obtenemos las gráficas para analizar la latencia en un escenario como el especificado en este trabajo, el cual cuenta con más de un nodo móvil.



**Análisis de latencia de handover
en WLANs para aplicaciones
en tiempo real**

Idónea Comunicación de Resultados
para obtener el grado de:
MAESTRA EN CIENCIAS Y
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
presentada por
Azalia Patiño Castillo

Asesor:
Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa frente al jurado integrado por:

Dr. Enrique Stevens Navarro - Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos - Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina - Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

9 de enero de 2014