

Trasposos verticales: Visión general e innovaciones

Vertical Handoff: Overview and Innovations

Carlos Andrés Ríos López, Ing.
Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín, Colombia
carlosrios74@gmail.com

Fecha de recepción: 04-03-2009

Fecha de selección: 28-10-2009

Fecha de aceptación: 06-07-2009

ABSTRACT

In zones where wireless access networks of various type, coverage, technology and capacity are available, mobility has to deal with the user equipment's ability to seamlessly switch between different links, even in the middle of an active session. The network has to continuously cope with the selection of a possible new channel for the mobile terminal, and the soundness of this decision has a tremendous impact on the overall performance of the network and quality of service. This survey presents vertical handover related background, research challenges

an state-of-the-art proposals in this field.

KEYWORDS

Vertical Handoff, Decision Algorithm, Vertical Handoff Decision Policy, Heterogeneous Wireless Networks, Triggering Techniques, Cross-layer Models.

RESUMEN

La movilidad en zonas cubiertas por redes de acceso inalámbrico de diferente tipo, alcance, tecnología y capacidad, incluye la habilidad del equipo móvil para realizar cambios de canal entre las distintas redes

de forma casi imperceptible para el usuario, aun si se efectúa en medio de una sesión que cursa tráfico. La selección de una nueva conexión para el terminal móvil es una decisión que debe ser enfrentada permanentemente por el sistema y que tiene efectos positivos o negativos para el servicio y para la red misma, lo cual depende del acierto con que sea tomada. Este artículo expone la teoría general relacionada con el handoff vertical,

los diferentes retos que motivan la investigación y las innovaciones en este campo.

PALABRAS CLAVE

Handoff vertical, algoritmo de decisión, política de decisión de handoff vertical, redes inalámbricas heterogéneas, técnicas de triggering, modelos cross-layer

Clasificación Colciencias: Tipo 3

I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas de cuarta generación plantean un escenario en el cual los equipos móviles disponen de diferentes tecnologías de acceso, y donde el sistema debe brindar al usuario la posibilidad de usar sus aplicaciones de red en cualquier momento y desde cualquier lugar de forma transparente.¹ Es común hoy en día encontrar dispositivos móviles preparados para operar con al menos dos o tres interfaces de acceso simultáneas, las más comunes WLAN (sigla en inglés para Wireless LAN), GSM (sigla en inglés para Global System for Mobile communications), WCDMA (sigla en inglés para Wideband Code Division Multiple Access), Bluetooth y WiMAX.^{2,3,4}

Cuando el dispositivo móvil con una sesión activa se encuentra en una zona cubierta por diversas tecnologías de acceso, el sistema debe decidir si el equipo mantiene su conexión actual o si la debe cambiar por una nueva conexión con la mejor de las redes disponibles, no importa que sea de una tecnología diferente. Siempre que sea viable, este traspaso debe ser transparente, y la nueva conexión escogida tendrá que ofrecer las prestaciones mínimas para que la experiencia del usuario no se vea afectada.

Este documento condensa la teoría relacionada con el handoff vertical, sus fundamentos, los retos que enfrenta y los aportes más innovadores en la literatura reciente. El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección II expone los conceptos básicos del handoff como procedimiento fundamental en una red celular. Luego la sección III presenta la conceptualización consolidada a partir

de los trabajos recientes en el campo de los algoritmos de traspaso vertical destacando una clasificación de dichas estrategias de selección de redes y las motivaciones hacia la investigación en esta área. En la sección IV se describen aportes significativos y novedosos de la literatura más reciente. La sección V da a conocer un análisis general de las distintas propuestas. Finalmente la sección VI muestra las conclusiones y futuros rumbos en este campo de investigación.

II. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HANDOFF

A. Definición de Handoff

El traspaso (handover o handoff en inglés) en su sentido más amplio se define como el proceso que permite a la red celular proporcionar continuidad de una llamada activa, transfiriéndola de una celda a otra.^{5,6,7,8} La estructura natural de una red celular limita el alcance y calidad de un canal en función de la distancia y de otros factores. En consecuencia, a medida que un terminal móvil se desplaza o sus condiciones de enlace cambian, la red debe propiciar la asignación dinámica de los canales para procurar una comunicación continua desde la percepción del usuario.^{5,6,7,8} La calidad de una técnica de handoff se mide básicamente al evaluar dos aspectos deseables: En primer lugar que minimice la probabilidad de terminación forzada de la comunicación y en segundo lugar que reduzca al mismo tiempo la probabilidad de bloquear nuevas llamadas.^{9,10}

B. Realización del Handoff

Dado que la comunicación entre el móvil y la red se efectúa mediante

señales de radio, la decisión del handoff se basa fundamentalmente en la medición de la RSS (Received Signal Strength) de la estación base actual, comparada con las RSSs de estaciones bases vecinas. Dependiendo de los criterios con los cuales se inicia el handoff se destacan cuatro técnicas.^{5,6}

- **Potencia Relativa de la Señal (Relative Signal Strength):** Para la comunicación entre el móvil y la red se escoge la estación base cuya señal sea más fuerte, es decir, siempre que haya una estación vecina con señal más fuerte que la actual se inicia el handoff. Esta estrategia puede generar efecto ping-pong, por lo que no se considera óptima.
- **Potencia Relativa de la Señal usando Umbral (Relative Signal Strength with Threshold):** Al criterio de la técnica anterior se le adiciona la condición de que el handoff sólo se inicia si la señal actual está por debajo de un umbral de potencia T. Con esto se reduce el problema del ping-pong.
- **Potencia Relativa de la Señal usando Histéresis (Relative Signal Strength with Hysteresis):** El handoff se realiza cuando la señal actual es inferior a la señal vecina en un valor de histéresis H.
- **Potencia Relativa de la Señal usando Umbral e Histéresis (Relative Signal Strength with Threshold and Hysteresis):** El handoff se inicia cuando se cumplen conjuntamente las condiciones de las dos últimas técnicas.

Los valores de T y H no se definen arbitrariamente sino teniendo en cuenta el umbral mínimo del receptor que corresponde a la potencia de señal mínima debajo de la cual la comunicación se degrada a un punto que se hace imposible.

C. Control de la Decisión

Cada red celular define la mecánica para realizar la decisión del handoff entre los elementos del sistema. Según la distribución de los roles en la realización del handoff se plantea la siguiente clasificación.^{5,6,7,8}

- **Handoff Controlado por la Red (Network Controlled Handoff - NCHO):** La red se encarga de las mediciones y de la decisión misma.
- **Handoff asistido por el móvil (Mobile Assisted Handoff - MAHO):** El móvil realiza las mediciones periódicas pero la red es responsable de la decisión. Comparado con el modelo anterior la red tiene menos carga en el proceso de handoff. Es usado en GSM.
- **Handoff Controlado por el móvil (Mobile Controlled Handoff - MCHO):** El móvil obtiene las mediciones de la red, del móvil mismo y realiza la decisión.

D. Transferencia de Canal en el Handoff

- **Handoff Duro (Hard Handoff):** En sistemas como FDMA y TDMA transferir el canal en un handoff implica terminar la comunicación actual y seguidamente establecer comunicación sobre un nuevo canal en una nueva frecuencia y/o slot lo cual

significa una interrupción momentánea.¹¹

- Handoff Suave (Soft Handoff): En sistemas como CDMA y WCDMA transferir el canal no implica cambiar la frecuencia, al contrario, las estaciones vecinas operan en la misma frecuencia y en ciertos momentos transmiten simultáneamente las señales desde y hacia el mismo móvil. Si en esta situación hay un cambio de estación base actual, ésta de hecho ya se encontrará enganchada al móvil.¹¹

E. Motivo de iniciación del Handoff

Según las razones de iniciación del handoff se considera handoff forzado al que se realiza en un corto tiempo debido al deterioro del enlace o a congestión de tráfico, en el caso de sistemas WCDMA; de otra parte se considera handoff voluntario aquel que se realiza con la finalidad de maximizar la satisfacción del usuario.¹²

F. Escenarios del Handoff

Se conoce como handoff horizontal al que se realiza entre redes homogéneas, de otra parte, el handoff vertical es el que se hace entre redes heterogéneas, es decir, de distintas tecnologías.^{10,13,14,15} El grupo de trabajo IEEE 802.21 destaca que el handoff vertical permite seleccionar una nueva red de manera oportunista, en contraste con el handoff horizontal donde las oportunidades son limitadas. Este documento se concentrará en exponer el escenario del handoff vertical.

G. Seguridad en el Contexto del Handoff Vertical

De acuerdo con las relaciones de confianza entre la red origen, la red destino y el terminal móvil¹⁶ define los posibles esquemas de transferencia del contexto de seguridad. *Sin acoplamiento*: Cuando no hay confianza entre la red origen y la red destino se hace necesaria una autenticación y autorización completa del equipo móvil en la nueva red. Obliga a utilizar un esquema de 'interrumpir antes de hacer' creando dificultades a la transparencia. *Acoplamiento débil*: Si las redes origen y destino tienen algún grado de confianza entre sí, puede darse una transferencia parcial del contexto de seguridad que reduce en parte la latencia del handover. *Acoplamiento fuerte*: Cuando las redes de acceso pertenecen a un mismo propietario pueden ser configuradas para confiar completamente entre sí.

III. HANDOFF VERTICAL

A. Proceso del Handoff Vertical

En el proceso de handoff vertical o traspaso entre redes de distinta tecnología se identifican tres etapas fundamentales:¹⁷ En primer lugar el descubrimiento del sistema, es decir, monitoreo y medición de las redes disponibles en el entorno y sus características estáticas y dinámicas, en segundo lugar la decisión del traspaso vertical y en tercer lugar la ejecución propiamente dicha del traspaso. Para otros autores¹⁸ no son tres sino dos las etapas: Iniciación del handover y ejecución del handover. La Figura 1,¹⁹ ilustra más claramente las etapas en la gestión del Handoff.

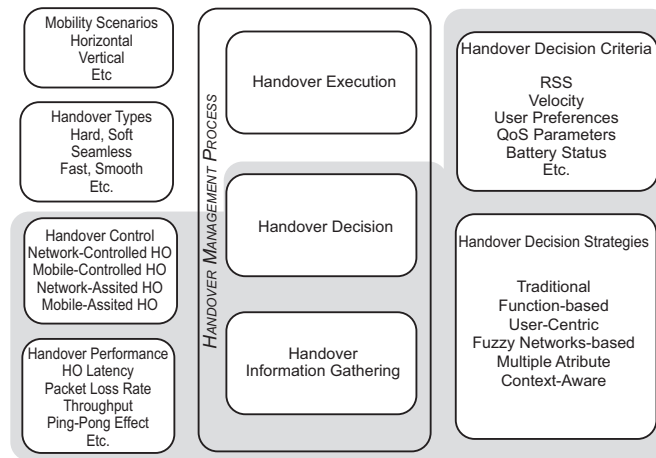


Figura 1. Concepto de gestión de trasposos¹⁹

B. Fundamentos

Según trabajos recientes publicados en la materia, el procedimiento de seleccionar la red de acceso más conveniente debe considerar conjuntamente a los actores involucrados en el proceso de decisión, con las siguientes restricciones:²⁰

- Los usuarios deben tener movilidad transparente entre redes de acceso heterogéneas.
- Los flujos de las aplicaciones deben ser transmitidos por medio de las redes más adecuadas que satisfagan sus requerimientos.
- El operador debe garantizar el uso óptimo de sus recursos.

Además de conciliar los objetivos de estos actores, la estrategia de decisión debe ser eficiente, ya que una decisión tardía puede llevar a la degradación o caída de la conexión y una decisión apresurada a un mal uso de los recursos del sistema.²¹ Para garantizar transparencia durante el handoff se consideran dos aspectos

críticos:²² Baja latencia y baja pérdida de paquetes.

Los algoritmos de decisión para tras-paso vertical propuestos en trabajos recientes establecen un grupo de criterios con base en los cuales se determina la realización de un cambio de conexión. Los criterios estáticos son aquellos inherentes a la red de acceso o al equipo terminal que no varían mucho, los criterios dinámicos son indicadores o características que cambian permanentemente. En la literatura se ha sugerido la siguiente clasificación de los criterios de decisión:¹⁹

- Relativos a la red: Cobertura, ancho de banda, latencia, RSS, CIR, SIR, BER, costo monetario, nivel de seguridad.
- Relativos a la terminal móvil: Velocidad, energía en la batería, información de localización.
- Relativos al usuario: Perfil y preferencias.
- Relativos al servicio: Capacidad del servicio, calidad de servicio, etc.

En la sección II parte D se introdujo una clasificación del handoff según el modo como se realice la transferencia del canal, para diferenciar entre handoff duro y handoff suave. En la literatura del handoff vertical se usa con frecuencia la clasificación de algoritmos BBM (break before make) y MBB (make before break).²³ En los primeros se realiza primero la desconexión del canal actual antes de realizar conexión al nuevo, redundando en un cierto retraso mientras se hace el procedimiento. De otro lado los algoritmos MBB adelantan la nueva conexión antes de terminar la sesión con el canal actual, lo que redundaría en menor interrupción pero mayor consumo de recursos.

El procedimiento de traspaso vertical implementa una política de decisión que influye en la selección al dar mayor o menor importancia a cada uno de los criterios que intervienen. Los trabajos recientes en la materia plantean una variedad de estrategias para toma de decisiones que se pueden categorizar así:¹⁹

- *Estrategias basadas en funciones de decisión:* Se caracterizan por definir una función de costo en donde se ponderan diferentes parámetros. La función es calculada en cada una de las redes candidatas para traspaso vertical y se escoge aquella que ofrezca el mayor beneficio.
- *Estrategias centradas en el usuario:* Las propuestas de decisión centradas en el usuario dan máxima importancia a los criterios relacionados directamente con las preferencias del usuario, normalmente costo y calidad de servicio.
- *Estrategias basadas en toma de decisiones con múltiples atributos (acrónimo en inglés MADM):* Consiste en aplicar de forma disciplinada la teoría de toma de decisiones al problema de seleccionar una red para el traspaso vertical. Se considera una decisión de múltiples atributos ya que por definición se trata de dar preferencias entre alternativas caracterizadas por atributos múltiples normalmente conflictivos. Los métodos clásicos más aplicados son: Ponderación Aditiva Simple (sigla en inglés SAW), Técnica para Preferencia de Orden mediante Similitud con la Solución Ideal (sigla en inglés TOPSIS), Proceso Jerárquico Analítico (sigla en inglés AHP), Análisis Relacional Gris (sigla en inglés GRA).
- *Estrategias basadas en lógica difusa y redes neuronales:* La aplicación de los conceptos de redes neuronales y lógica difusa se ajustan mejor a situaciones de decisión con información incompleta.
- *Estrategias contextualizadas:* Las estrategias de decisión contextualizadas se basan en el conocimiento preciso de la información que rodea al terminal móvil y la red en todo momento.
- *Estrategias basadas en cadena de decisión de Markov (sigla en inglés MDP):*^{24,17} Se fundamentan en analizar cómo un proceso markoviano de nacimiento y muerte tiene alguna magnitud de interés para la decisión. En este modelo las decisiones que se tomen determinan la recompensa obtenida pero también tienen un costo.

- *Estrategias basadas en posicionamiento:*²¹ Estas estrategias toman como premisa que el equipo móvil tiene conocimiento permanente de sus coordenadas geográficas, y al mismo tiempo de la topología de las redes presentes en su zona de interés.
- *Técnicas de triggering:*^{25,26} La métrica fundamental para determinar la necesidad de un handoff es la RSS. Este criterio sigue manteniendo validez pero ha sido ampliado para contemplar triggers o eventos de iniciación de handoff distintos que aseguren la preparación y ejecución del traspaso en un momento oportuno.
- *Algoritmos cross-layer:*^{27,23} Estos algoritmos procuran la optimización del handoff al hacer más eficiente la señalización y definir un esquema de colaboración flexible entre capas.

C. Desarrollos e iniciativas

Es oportuno mencionar en esta sección algunas iniciativas e implementaciones recientes en el campo de los trasposos verticales entre redes heterogéneas:

- Grupo IEEE 802.21 – MIH (Sigla en inglés para Media Independent Handover): Tiene como objetivo estandarizar el proceso de traspaso entre redes de acceso diversas.²⁸ Aunque aún no se ha producido un documento definitivo, actualmente se trabaja en consolidar un borrador revisado por lo cual está abierto a recibir observaciones. Un aporte importante del modelo MIH es la definición de una interfaz unificada

para publicar servicios, métricas y características de las redes que conviven en un ambiente heterogéneo, dicha interfaz funciona sobre la conexión activa, es decir, que se asegura un ahorro de batería al no necesitar encender otras interfaces.¹⁷ Mucha de la literatura producida últimamente en torno al tema de trasposos verticales fue motivada por el desarrollo de este estándar.

- ETSI/3GPP TS 43.318 – UMA (sigla en inglés para Unlicensed Mobile Access), GAN (sigla en inglés para Generic Access Network): Esta especificación técnica propone un marco fuertemente acoplado entre redes de acceso como WLAN y redes GSM para permitir trasposos entre estas tecnologías en un equipo móvil. El algoritmo de decisión de traspaso es simple y consiste en monitorear desde el dispositivo móvil la presencia de una red preferencial como WLAN, una vez identificada se reporta este nodo GAN (WLAN) en la lista de vecinos como la estación con mejor nivel de recepción haciendo que la red GERAN (sigla en inglés para GSM EDGE Radio Access Network) la escoja para el traspaso.²⁹ La tecnología GAN está siendo aplicada exitosamente por varios operadores de telefonía celular en el mundo como T-Mobile en Estados Unidos, e incorporada por muchos fabricantes en los dispositivos móviles que producen.

D. Motivaciones para la investigación en el área

La anterior sección presentó una implementación real de traspaso

vertical vigente en el mercado, que aunque simple, ha tenido buena respuesta por parte de los suscriptores. Entonces, ¿por qué investigar en el área de las estrategias de selección de una red de acceso para traspasos verticales? A continuación algunas razones:

- La tendencia es que un equipo móvil soporte más de dos interfaces de acceso, por ejemplo UWB, BlueTooth, WiFi, GSM, WiMAX, WiBro, UMTS, EV-DO simultáneamente. Luego es inevitable recurrir a modelos más amplios de decisión que cubran una gran variedad de escenarios.
- El modelo de decisión de traspaso definido por GAN sólo se basa en la presencia de una red WLAN que permita conexión extremo a extremo con un GANC (sigla en inglés para Controlador GAN) para los traspasos de GSM hacia WLAN, y la calidad del uplink WLAN y mensajes de RTCP para el traspaso inverso, desconociendo otros factores como nivel de batería en el dispositivo móvil, capacidad actual de la celda WLAN, ubicación, seguridad, costo, velocidad, QoS, probabilidad de caída, etc.
- El algoritmo de decisión de traspaso en GAN resuelve y ejecuta el cambio a nivel de toda la conexión y no a nivel de sesiones del dispositivo móvil.

Muchos de estos problemas están siendo abordados por el grupo IEEE 802.21 y también por el grupo que trabaja en futuras versiones del 3GPP TS 43.318. Estas mejoras necesarias también han motivado el

interés de la comunidad investigativa, en torno al tema de movilidad y traspasos verticales.

IV. RESUMEN DE PROPUESTAS INNOVADORAS EN HANDOFF VERTICAL

A continuación se exponen y analizan algunas propuestas novedosas publicadas en la literatura reciente clasificadas según su interés principal.

A. Desempeño de TCP

Una de las mayores preocupaciones de muchos autores es la forma sensible como el tráfico TCP afectado por los handoff, ³⁰ resume los principales problemas:

- Pérdida de paquetes durante el cambio de interfaz de red, se puede mitigar con técnicas ‘make before break’.
- Cambio de una ruta lenta a una ruta más rápida: Se producen desordenamientos debido a adelantamientos de los paquetes que viajan por la nueva ruta rápida dando origen a falsas retransmisiones cuando en realidad no hubo pérdida de paquetes.
- Cambio de una ruta rápida a una más lenta: Los ACKs pueden no llegar a tiempo generando RTOs y obligando a retransmisiones.
- Cambios en el BDP (Bandwidth-Delay Product): Estos cambios toman por sorpresa a las ventanas definidas produciendo subutilización o desbordamiento.

Estas preocupaciones han sido abordadas en la literatura con varias propuestas. La propuesta ^{31,32,33} es contener el ritmo de TCP mientras se realiza el handoff y reajustar una

vez haya concluido. La propuesta es aumentar a un valor muy alto el vencimiento de tiempo para retransmisión o RTO,³⁴ dado que al hacerlo durante el handover se mitiga el problema de las retransmisiones innecesarias, contrasta lo anterior con la idea de más bien hacer un cálculo del RTO más apegado a la medida de RTT, de acuerdo con las condiciones del cambio dado por el handover. Las fuentes^{35,36,37} representan esta iniciativa. Se presenta un intento por adaptar de manera más oportuna la ventana de congestión.^{34,38,39,35,40,41,42} De otro lado,³⁹ se aproxima a la necesidad de una mayor tolerancia al desorden en que pueden llegar los paquetes durante un handoff. La innovación³⁰ consiste en enfocar la solución de manera más sistemática, sin necesidad de un conocimiento previo de las condiciones y características de la nueva red. Para esto plantea el uso de un trigger que informa a la capa de red de la ocurrencia del handover, hace que el receptor devuelva dos ACKs idénticos, uno por la ruta vieja y otro por la nueva ruta para evitar RTOs innecesarios, también establece un mecanismo de sondeo de BDP para una mejor adaptación y hace agregación de ACKs para atacar el problema de desordenamiento por nueva ruta rápida. Esta propuesta muestra resultados de simulación muy favorables para el desempeño de TCP en un amplio espectro de escenarios de handover vertical.

A. Estrategias de decisión basadas en MDP

Los autores⁴³ proponen un sistema de decisión basado en teoría de control difuso donde se selecciona la mejor estación base para el handoff, a par-

tir de funciones de membresía sobre tres parámetros de entrada: nivel de potencia que se recibe de la estación base candidata, costos de operación de la red a la que pertenece la estación base candidata, y las cantidades de ancho de banda sin usar de la estación base candidata.

Se hace el planteamiento de un algoritmo de decisión²⁴ basado en un proceso markoviano donde se privilegia el justo balanceo de carga para escoger la nueva conexión. Apoyado en un modelo MDP (sigla en inglés para Markov Decision Problem) el algoritmo calcula el costo de traspaso en términos de carga de tráfico hacia cada una de las redes candidatas y escoge la que conlleve menor costo. El proceso de nacimiento y muerte aplicado sobre el recurso de ancho de banda que se desarrolla matemáticamente en el artículo, con base en supuestos de independencia de enlace y separabilidad de costos de ruta, queda reducido a una fórmula que permite determinar el costo de llevar una conexión clase k en la red w con ocupación i . El análisis de complejidad computacional de este algoritmo muestra un resultado $O(N)$ donde N es el número de redes WLAN o WMAN candidatas. La simulación del modelo de decisión costo-MDP complementado con una estrategia de iniciación de traspaso vertical basada en predicción de RSS (sigla en inglés para Received Signal Strength) arrojó buenos resultados cuando se le comparó contra una estrategia basada únicamente en RSS o RSS con histéresis en aspectos como número de traspasos verticales, sumatoria de grado de servicio ponderado (sigla en inglés SWGoS) y utilización de la red. Este modelo de decisión, sin embar-

go, se concentra en el aspecto de la utilización equilibrada del ancho de banda de la red, desconociendo otros criterios también importantes en una toma de decisión de traspaso como se comentó antes en este artículo.

De otro lado, la propuesta,¹⁷ está principalmente motivada en dos aspectos, el primero tener más en cuenta para la decisión de traspaso vertical las necesidades de calidad de conexión, y en segundo lugar considerar la carga de procesamiento y señalización que trae consigo la ejecución del traspaso. El modelo MDP planteado aquí presupone que la decisión de traspaso se hace permanentemente en intervalos (épocas), define estados, el espacio de decisiones, una política expresada en reglas y una función de recompensa/costo del enlace basada en la calidad de servicio del enlace candidato y el costo de señalización por realización del traspaso. Para resolver la política óptima proponen el Algoritmo de Iteración de Valor (su sigla en inglés es VIA) cuya complejidad computacional se estima en $O(|A| |S|^2)$ donde A es el conjunto de acciones y S es el conjunto de estados, aunque existen mejoras al algoritmo. Dos aspectos importantes de esta propuesta son la extensibilidad del modelo para tomar en cuenta nuevos criterios recompensa/costo, y que además está alineado con los planteamientos del estándar en desarrollo IEEE 802.11. La simulación se enfocó en comparar el desempeño de la política presentada respecto de las políticas óptimas basadas en otros modelos como SAW, TOPSIS y GRA, así como el de un esquema basado en ancho de banda y un modelo consistente en no hacer ningún traspaso. El experimento se realizó para tráfico de voz y para

tráfico FTP dando como resultado una recompensa total superior de MDP respecto a SAW, TOPSIS, GRA, la heurística de ancho de banda y la heurística de no traspasos, también un menor número de traspasos solo superado por la política de no traspasos.

B. Estrategias de decisión basadas en posicionamiento

Los mecanismos de handoff basados en posicionamiento permiten predecir la ocurrencia del traspaso con anticipación. Al poder adelantar los preparativos se logra una ejecución del handover más transparente.⁴⁴

Se plantea²¹ un algoritmo de traspaso vertical basado en posicionamiento. El modelo plantea los siguientes requisitos: El usuario debe descargar en su equipo móvil información actualizada de ubicación y radio de cobertura de las BS en su área de interés, también el dispositivo móvil tendrá que estar equipado con un sistema GPS y deberá tener información de los retardos promedio por ejecución de traspaso.

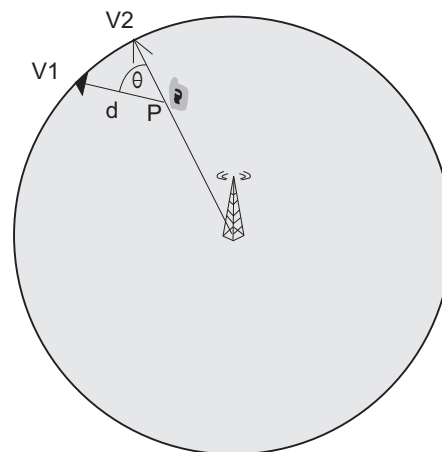


Figura 2. Algoritmo de decisión basado en posicionamiento²¹

Ante una situación como la que plantea la Figura 2, donde el indicador RSS ha caído por debajo de un umbral, el algoritmo propuesto toma en consideración el ángulo de movimiento, la velocidad, un margen de error del GPS y el retardo que induciría el posible traspaso para determinar si es el momento de realizar el cambio de conexión, si ese es el caso se selecciona la conexión con la estación base más cercana, de acuerdo con la información geográfica cargada previamente en el dispositivo móvil. La simulación mostró en comparación con algoritmos basados en RSS + histéresis un mejor desempeño, aunque no la eliminación completa del efecto ping pong ni la falsa iniciación de traspasos.

C. Técnicas de triggering

Literatura reciente⁴⁵ identifica los triggers o eventos de iniciación del handoff vertical como cambios que pueden ocurrir en cualquiera de las capas del stack de movilidad, como muestra la Figura 3.

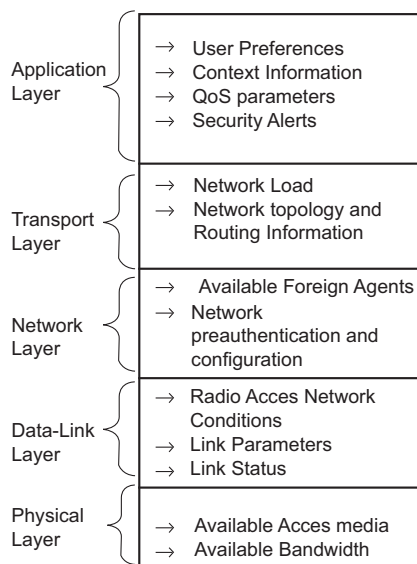


Figura 3. Eventos y triggers por capa⁴⁵

En situaciones⁴⁶ donde una salida abrupta de cobertura WLAN obliga rápidamente a enganchar una red exterior, es fundamental que el nivel físico genere avisos oportunos que den inicio al handoff.

Se propone²⁵ un modelo de predicción de la posición como instrumento para conseguir una iniciación del handoff mucho más precisa. El artículo considera tres tipos de movimientos clásicos de un móvil: Recorrido aleatorio, modelo de gravedad que estima zonas de mayor preferencia que otras y finalmente un modelo de apego a la ruta. Estos tres modelos de comportamiento de la movilidad son evaluados con un algoritmo que propone un rastreo basado en entradas y salidas de estaciones base, este algoritmo es independiente de la tecnología de las redes en un contexto heterogéneo. Para la detección de los patrones de comportamiento de los móviles se mencionan tres algoritmos: árboles de decisión, k-ésimo vecino más cercano, y máquinas de vector soporte. Con el primer algoritmo se construye el modelo de representación y decisión markoviano. Las simulaciones dejan como conclusión que la propuesta de un modelo de predicción basado en estadísticas de residencia por estación base es efectiva para todos los patrones de movimiento. De otra parte²⁶ se evalúa en el contexto de redes solapadas WLAN y 3G mediante simulación, cinco algoritmos de predicción clásicos.

Algoritmo de predicción basado en RSS con umbral: Si la RSS del AP WLAN actual está por debajo de un umbral de potencia, el móvil ubica las señales vecinas más fuertes y se realiza el handoff al nuevo AP. Cuando no

existe un AP con RSS más fuerte se inicia handoff a 3G. Ver Figura 4.

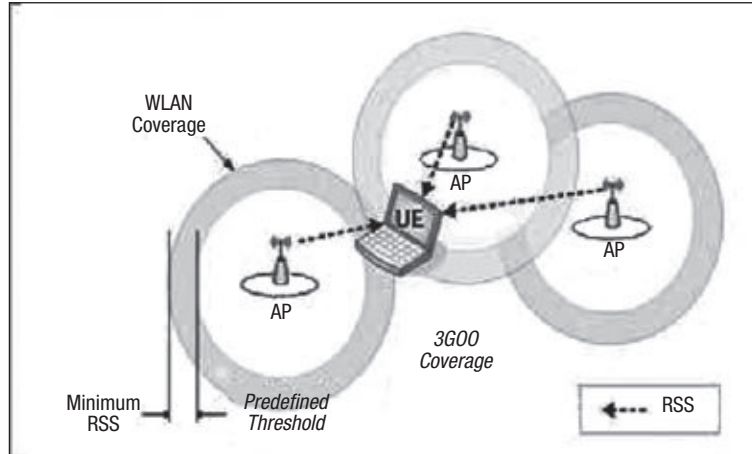


Figura 4. Predicción basada en RSS²⁶

Algoritmo de predicción basado en extrapolación de movimiento: Este algoritmo predice el handoff extrapolando el movimiento del móvil con base en su posición actual, dirección y velocidad. Si la posición esperada

unos instantes después está atendida por un AP distinto al actual, entonces se inicia el handoff al AP, si no hay un AP apropiado se inicia handoff a 3G. Ver Figura 5.

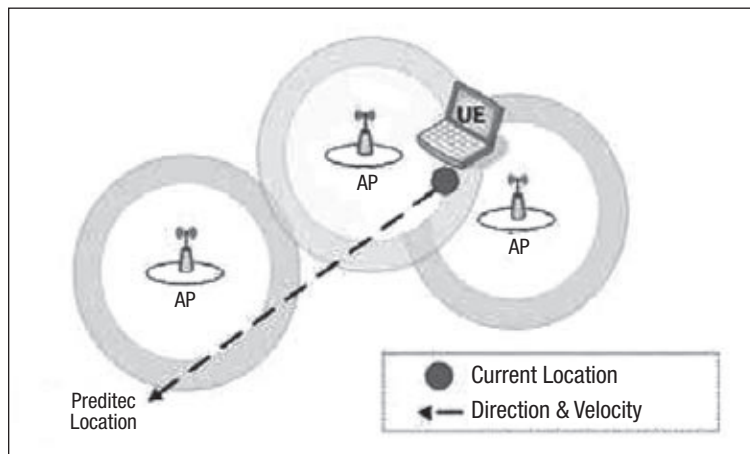


Figura 5. Predicción basada en extrapolación del movimiento²⁶

Algoritmo de predicción basado en datos históricos de handover: Este algoritmo recoge desde los equipos móviles información histórica de las rutas que recorren y los handoffs

que ocurren siguiendo esas rutas. Con base en esta historia se realiza la predicción del handoff con mucha precisión. Ver Figura 6.

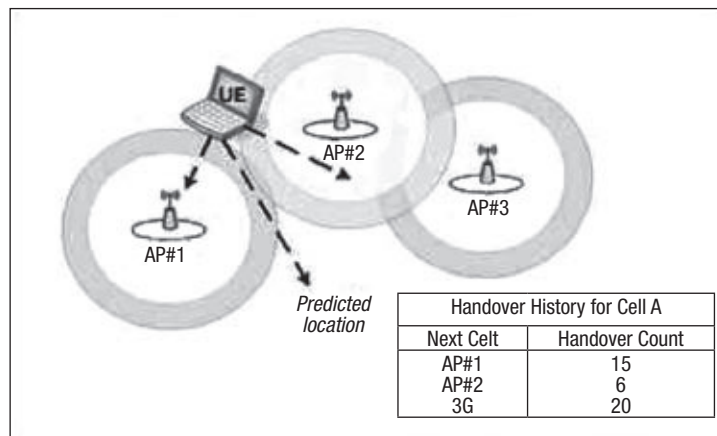


Figura 6. Predicción basada en datos históricos²⁶

Algoritmo de predicción basado en patrón de movilidad: Este algoritmo registra los patrones de movilidad. Con base en esta información se predice el siguiente handoff a AP

o UTRAN. Este algoritmo registra más variaciones que el anterior, por lo tanto ofrece mayor precisión. Ver Figura 7.

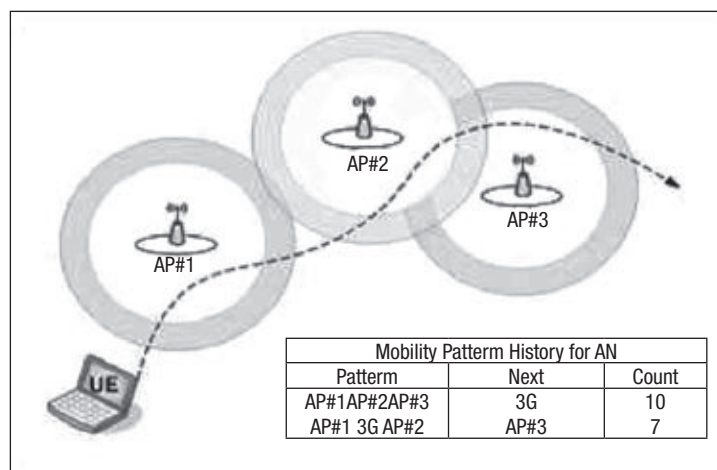


Figura 7. Predicción basada en patrón de movilidad²⁶

Algoritmo de predicción basado en distancia del AP: La distancia del móvil respecto al AP actual y vecinos es monitoreada constantemente, de este modo si unos instantes más adelante se prevé que el móvil saldrá del radio de cobertura, entonces se

inicia el handoff al AP apropiado y en caso de no haberlo hacia 3G. Este algoritmo puede ser más rápido pero menos preciso pues no tiene en cuenta la velocidad y trayectoria del móvil. Ver Figura 8.

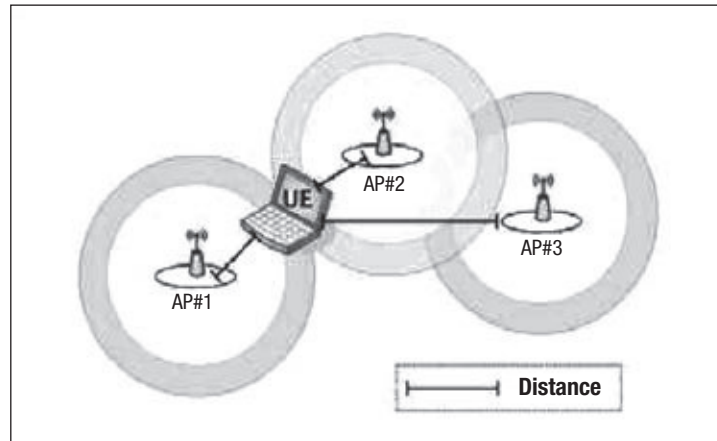


Figura 8. Predicción basada en distancia²⁶

La Figura 9 muestra el modelo de red sobre el cual se efectuó la simulación de cada uno de los algoritmos. En este modelo se simularon dos escenarios

de movilidad: modelo aleatorio de posición y modelo realista de trayectoria.

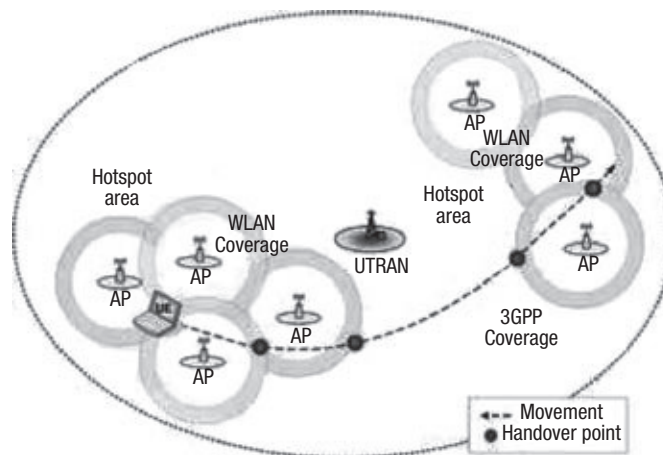


Figura 9. Modelo de simulación²⁶

La Figura 10 ilustra las tasas de acierto de predicción en cada uno de los algoritmos para un escenario de movilidad realista. El algoritmo de predicción basado en patrón de movilidad y el basado en datos históricos muestran el mejor comportamiento, aunque cabe advertir que son los más costosos computacionalmente.

La Figura 11 muestra las tasas de acierto de predicción de los algoritmos en el escenario de aleatoriedad de la posición. En este caso el algoritmo de predicción basado en patrón de movilidad y el basado en datos históricos muestran un comportamiento aceptable pero inferior al anterior escenario, siendo superados por el algoritmo de extrapolación del movimiento.

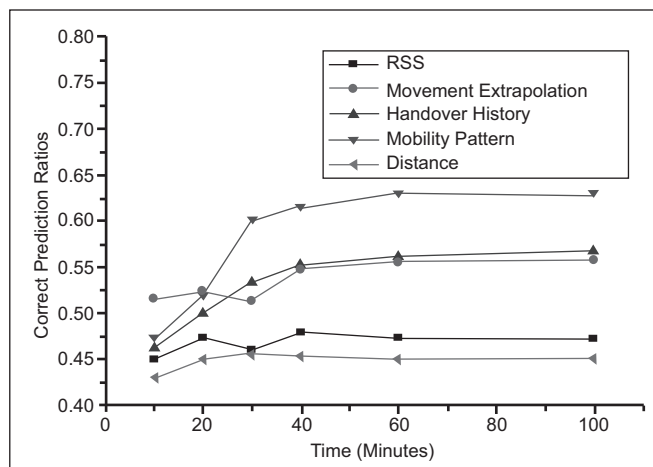


Figura 10. Tasas de acierto en escenario de movilidad realista²⁶

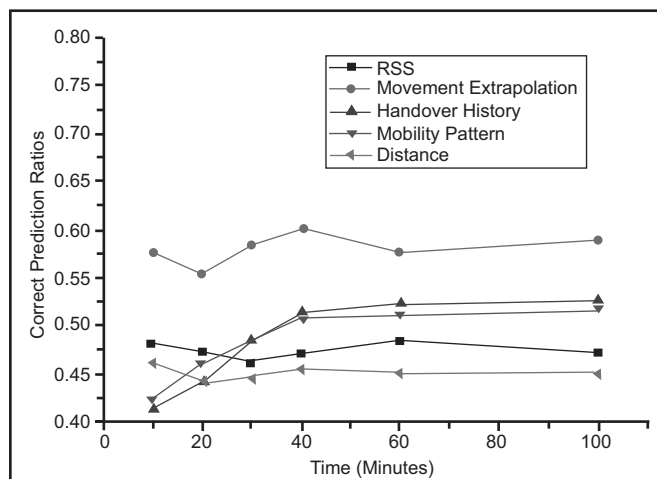


Figura 11. Tasas de acierto en escenario de movilidad aleatorio²⁶

D. Modelos cross-layer

Se propone²³ un modelo de decisión donde participan diferentes capas. Ver Figura 12.

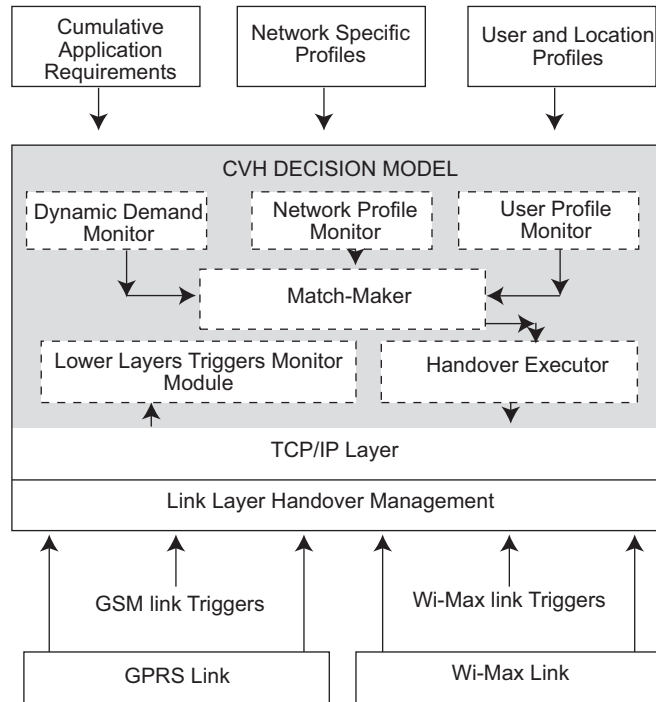


Figura 12. Arquitectura del esquema de handover vertical cross-layer²³

La arquitectura de la propuesta define cuatro orígenes principales de información: Network layer triggers como por ejemplo link going down, new link detected, link quality down, link, etc, requerimientos de aplicación, preferencias específicas de red y perfiles de usuario-ubicación. En el corazón se encuentra un motor de decisión que se activa con cualquiera de los eventos de iniciación o triggers y que representa las condiciones mediante mapas de bits y como resultado mejor desempeño del algoritmo de decisión.

Se propone²⁷ una optimización cross-layer para el handoff vertical entre WiMAX móvil y redes 3G en especial mejorando la señalización de capas 2 y 3. El esquema propuesto consiste en: 1) Reordenar y/o paralelizar los mensajes de señalización de las capas 2 y 3. 2) Combinar mensajes de señalización de estas dos capas. La propuesta se desarrolla sobre Mobile IPv6 y su extensión en redes WiMAX, 3GPP y 3GPP2. La simulación fue realizada con distintos tipos de tráfico y demostró mejoras sustanciales con la disminución en la latencia.

Se presenta⁴⁷ una plataforma para handover vertical entre WLAN y 3G con triggering predictivo, basado en una nueva medida denominada WAT (WLAN Available Time) con el cual se estima qué tanto tiempo el equipo de usuario se mantendrá conectado en WLAN; esta predicción favorece el uso de FMIPv6.

E. Propuestas alternativas

Con el fin de conseguir transparencia para un control más eficiente del handover entre redes diversas desde el equipo del usuario,⁴⁸ se propone una arquitectura abierta basada en un middleware de tres componentes. API de abstracción, API de gestión, y API de handoff. Esta arquitectura fue simulada en un banco de pruebas para escenarios de handoff entre WLAN y 3G LTE, con buenos resultados en la continuidad del tráfico multimedia y FTP.

Los autores⁴⁹ introducen un nuevo protocolo para hacer más eficiente y transparente el handover entre redes heterogéneas, y lo han denominado 'takeover' (toma del mando). El esquema parte de identificar dos de las operaciones que más retardos añaden durante un handover: la autenticación y el registro. Un equipo móvil puede iniciar el handover e invocar inicialmente una solicitud de takeover, al hacerlo, si existe un móvil vecino que ya se encuentre vinculado a la red de destino puede este último en representación suya realizar un pre-registro y pre-autenticación en la nueva red. Habiendo adelantado estas dos operaciones finalmente se realiza la desconexión de la capa 2 de la antigua red y la vinculación a nivel de capa 2 del nuevo enlace. Los resultados de la simulación muestra-

ron una realización de handoff más rápida y transparente.

Se presenta una optimización para el handoff entre redes WLAN y WiMAX. En el supuesto de que las redes WLAN y WiMAX están fuertemente acopladas, los autores sugieren aprovechar el modo 'sleep' de WiMAX para reducir la latencia del handover, haciendo que la señalización del procedimiento de entrada a WiMAX se haga anticipadamente para que el handover propiamente dicho del móvil se simplifique como la realización de un procedimiento de entrada a modo 'awake' sobre la nueva red.

V. ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS

La literatura revisada muestra una amplia variedad de enfoques orientados a abordar el tema de la ejecución de traspasos verticales, donde cada propuesta tiende a privilegiar unos aspectos más que otros. En los trabajos^{30,42} el foco de preocupación se sitúa en la necesaria adaptación del protocolo TCP a las condiciones predominantes en un traspaso vertical, a fin de garantizar transparencia durante el cambio de enlace, concluyendo que es imprescindible ajustar el comportamiento de este protocolo durante la realización del handoff. La selección de un enlace óptimo también es un tema relevante de investigación, según los planteamientos revisados, en ambientes heterogéneos hay una marcada tendencia hacia considerar un mayor número de criterios a la hora de seleccionar una nueva conexión durante un traspaso vertical. En tal sentido la proposición basada en MDP¹⁷ se ajusta mejor a este punto de vista, aunque tiene en principio mayor complejidad computacional

respecto a otros algoritmos. Esta propuesta tiene también la ventaja de estar diseñada en el marco del modelo planteado por IEEE 802.21 de una interfaz común de información acerca del sistema. De otra parte,²⁴ se propone un esquema simplificado donde se privilegia el buen balance de carga en el sistema, expresado en el uso inteligente del ancho de banda, esto permite reducir el modelo MDP a una fórmula de costo de fácil cómputo, aunque se descuidan otros criterios que podrían pesar negativamente en la decisión. La ubicación espacial del móvil es un factor determinante para el handoff. Se expone²¹ un algoritmo de traspaso vertical basado en información de posicionamiento y en el detalle de la distribución geográfica de las redes presentes en una zona determinada. Este esquema tiene el inconveniente de obligar a descargar con cierta frecuencia información de la topología zonal, y además un consumo importante de batería por el uso de GPS. La clave para un handoff exitoso,^{25,26} radica en la acertada predicción del handoff que permite adelantar la negociación antes de que el canal actual se degrade. Se han propuesto^{23,27,47} modelos que procuran una cooperación flexible entre capas, como mecanismo para mejorar la eficiencia del traspaso vertical; mediante la definición de triggers originados en distintos niveles se establece una señalización ágil que favorece la realización oportuna y eficiente del handoff. Otros autores⁴⁸ han hecho énfasis en presentar diseños arquitectónicos adecuados, para ofrecer interfaces eficientes con alto nivel de abstracción. Cabe reconocer las operaciones de autenticación y registro como las más costosas durante

la realización del traspaso entre redes heterogéneas.⁴⁹ Aquí los investigadores plantean la posibilidad de un pre-registro y una pre-autenticación por medio de un equipo móvil intermediario que ya esté vinculado. También se explota,⁵⁰ la reducción de retardos durante el handoff entre redes fuertemente acopladas, en este caso entre WLAN y WiMAX.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha hecho una revisión de los mecanismos de handover vertical propuestos en la literatura reciente, y se ha encontrado que el campo de los algoritmos de decisión para traspasos verticales continúa siendo un espacio abierto para la investigación.

Si bien ya existen aplicaciones prácticas como el servicio Hotspot@Home en Estados Unidos basado en 3GPP TS 43.318, es claro que en los ambientes inalámbricos del futuro se enfrentan retos que demandan soluciones más elaboradas y flexibles, que se adapten a las múltiples tecnologías radio disponibles.

La taxonomía presentada y los algoritmos analizados demuestran la gran variedad de enfoques aplicables al problema de decidir la mejor forma de lograr movilidad transparente para los usuarios. Un nicho importante de investigación hacia el futuro es la formulación de modelos de evaluación para algoritmos de decisión que provean un marco común de comparación entre las distintas propuestas.

Sería relevante también estudiar si la premisa actual de separar la decisión de las demás fases del traspaso es

correcta en términos de la evaluación de los algoritmos que se plantean, o si más bien es necesario considerar todas las fases en conjunto al momento de hacer la validación.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 C. Sun, E. Stevens-Navarro, V. Wong, "A Constrained MDP-based Vertical Handoff Decision Algorithm for 4G Wireless Networks," Conference on Communications, 2008. ICC 2008, pp. 2169-2174, May 2008.
- 2 C. Shieh, I. Lin, W. Lai, "Improvement of SCTP Performance in Vertical Handover", Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2008. ISDA '08. pp. 494 - 498, Nov 2008.
- 3 Y. Wei, X. Li, M. Song, J. Song, "Cooperation Radio Resource Management and Adaptive Vertical Handover in Heterogeneous Fourth International Conference on Wireless Networks", Natural Computation, 2008. ICNC '08. pp. 197 - 201. Oct 2008.
- 4 J. Zhang, H. Chan, V. Leung, "A SIP-Based Seamless-Handoff (S-SIP) Scheme for Heterogeneous Mobile Networks", Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE. pp. 3946 - 3950. Mar 2009.
- 5 S. Tekinay and B. Jabbari, "Handover and Channel Assignment in Mobile Cellular Networks", IEEE Communications Magazine, vol. 29, pp. 42-46, Nov 1991.
- 6 Gregory P. Pollioni, "Trends in Handover Design", IEEE Communications Magazine, vol. 34, pp. 82-90, Mar 1996
- 7P. Marichamy, S. Chakrabati and S. L. Maskara, "Overview of handoff schemes in cellular mobile networks and their comparative performance evaluation", IEEE VTC'99, vol. 3, pp. 1486-1490, 1999.
- 8 Nishint D. Tripathi, Jeffrey H. Reed and Hugh F. VanLandinoham, "Handoff in Cellular Systems", IEEE Personal Communications, vol.5, pp. 26-37, Dic 1998.
- 9 S. Tekinay and B. Jabbari, "A Measurement-Based Prioritization Scheme for Handovers in Mobile Cellular Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 10, no. 8, pp.1343-1350, Oct. 1992.
- 10 A. Iera, A. Molinaro and S. Marano, "Handoff Management with Mobility Estimation in Hierarchical Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 51, pp. 915-934, Sept. 2002.
- 11 Alexe E. Leu and Brian L. Mark, "Modeling and Analysis of Fast Handoff Algorithms for Microcellular Networks", Proceedings of the 10th IEEE MASCOTS'2002, pp. 321-328, Oct. 2002.
- 12 A. Ezzouhairi, A. Quintero, S. Pierre, "A fuzzy decision making strategy for vertical handoffs", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. 583 - 588, May 2008.
- 13 S. Oh, E. Cho, Y. Shin, J. Kim, "Vertical handover application

- development for multi-LAN based on SCA”, Proceedings of the 2004 Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, 2004. pp. 247 - 251, Dic 2004.
- 14 S. Chien, H. Liu, A. Low, C. Macciocco, Y. Ho, “Smart Predictive Trigger for Effective Handover in Wireless Networks”, IEEE International Conference on Communications, 2008. ICC ‘08. pp. 2175 - 2181, May 2008.
 - 15 E. Paik; S. Heo; H. Kim; J. Jin, S. Lee, “Seamless Vertical Handover Using Multihomed Mobile Access Point”, Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE. pp. 1 - 4 , Dic 2008.
 - 16 H. Wang, A. Prasad, “Security context transfer in vertical handover”, Personal, 14th IEEE Proceedings on Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. pp. 2775 - 2779, Sep 2003.
 - 17 E. Stevens-Navarro, Y. Lin, V. Wong, “An MDP-Based Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks,” Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 1243–1254, Mar 2008.
 - 18 L. Jian, Z. Yongsheng, D. Jun, L. Yang, H. Bo, “Adaptive Handoff Initiation Threshold Algorithm for Multi-Service Broadband Wireless Access System”, 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008. ICCSC 2008. pp. 148 - 152, May 2008.
 - 19 M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle, “An Overview of Vertical Handover Decision Strategies in Heterogeneous Wireless Networks,” Computer Communications 31, pp 2607-2620, Ene 2008.
 - 20 I. Lassoued, J. Bonnin, Z. Hamouda, A. Belghith, “A Methodology for Evaluating Vertical Handoff Decision Mechanisms,” Seventh International Conference on Networking, 2008. ICN 2008. pp. 377-384, Abr 2008.
 - 21 F. He, F. Wang, “Position Aware Vertical Handoff Decision Algorithm in Heterogeneous Wireless Networks,” International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM ‘08. 4th. pp 1-5. Oct 2008.
 - 22 W. Xiao, S. Tang, C. Chou, L. Chen, “VIP: a Virtual Interface-based Approach for vertical handover in single-subnet networks”, 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2007. AINA ‘07. pp. 436 - 442, May 2007.
 - 23 S. Ahmad, M. Akbar, M. Qadir, “A Cross-Layer Vertical Handover Decision Model for Heterogeneous Wireless Networks”, 4th International Conference on Innovations in Information Technology, 2007, pp. 441 – 445, Nov 2007.
 - 24 B. Chang, J. Chen, “Cross-Layer-Based Adaptive Vertical Handoff With Predictive RSS in Heterogeneous Wireless Networks,” Transactions on Vehicular Technology, IEEE Vol. 57, Issue 6. pp. 3679 – 3692, Nov 2008.
 - 25 S. Michaelis, C. Wietfeld, “Comparison of User Mobility Pattern

- Prediction Algorithms to increase Handover Trigger Accuracy”, Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd. Vol 2, pp. 952-956, May 2006.
- 26 H. Kwon, M. Yang, A. Park, S.Venkatesan, “Handover Prediction Strategy for 3G-WLAN Overlay Networks”, Network Operations and Management Symposium, 2008, pp. 819 – 822, Abril 2008.
- 27 J. Jo, J. Cho, “A Cross-Layer Vertical Handover between Mobile WiMAX and 3G Networks”, Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008, pp. 644 – 649, Agosto 2008.
- 28 IEEE, “Media Independent Handover Services”, <http://www.ieee802.org/21/>, IEEE 802.21, Jun 2009.
- 29 3GPP, “Generic Access Network (GAN)”, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/43318.htm>, ETSI/3GPP TS 43.318, Jun 2009.
- 30 D. Li; K. Sleurs, V. Lil, A. Van de Capelle, “A fast adaptation mechanism for TCP vertical handover”, International Conference on Advanced Technologies for Communications, pp. 203 - 206, Oct 2008.
- 31 T. Goff, J. Moronski, D. S. Phatak and V. Gupta, “Freeze-TCP: A True End-to-end TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environments”, Proc. IEEE INFOCOM 2000, pp.1537-1545, Mar 2000.
- 32 S.-E. Kim and J. A. Copeland, “TCP for Seamless Vertical Handoff in Hybrid Mobile Data Networks”, Proc. IEEE GLOBECOM 2003, pp.661-665, Dic 2003.
- 33 P. Sarolahti, J. Korhonen, L. Daniel and M. Kojo, “Using Quick-Start to Improve TCP Performance with Vertical Hand-offs”, Proc. IEEE LCN’06, Nov 2006
- 34 L. Daniel and M. Kojo, “Using Cross-layer Information to Improve TCP Performance with Vertical Handoffs”, Proc. IEEE AccessNets’07, Ago 2007.
- 35 K. Daoud and B. Sayadi, “HAD: a Novel Function for TCP Seamless Mobility in Heterogeneous Access Networks”, Proc. IEEE VTC-2007 Fall, Sep-Oct 2007.
- 36 H. Huang and J. Cai, “Improving TCP Performance during Soft Vertical Handoff”, Proc. IEEE AINA’05, Mar 2005
- 37 H. Rutagemwa, S. Pack, X. Shen and J. W. Mark, “Robust Cross-Layer Design of Wireless-Profiled TCP Mobile Receiver for Vertical Handover”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.56, No.6, Nov. 2007.
- 38 X. Wu, M. C. Chan and A. L. Ananda, “TCP HandOff: A Practical TCP Enhancement for Heterogeneous Mobile Environments”, Proc. IEEE ICC 2007, Jun 2007.
- 39 W. Hansmann and M. Frank, “On Things to Happen During a TCP Handover”, Proc. IEEE LCN’03, Oct 2003
- 40 Y. Matsushita, T. Matsuda and M. Yamamoto, “TCP Congestion Control with ACK-Pacing for

- Vertical Handover”, Proc. IEEE WCNC 2005, Mar 2005.
- 41 Y. Gou, D. AJ. Pearce and P. D. Mitchell, “A Receiver-based Vertical Handover Mechanism for TCP Congestion Control”, IEEE Trans. on Wireless Comm. Vol.5, No. 10, Oct 2006.
- 42 A. Gurtov and J. Korhonen, “Measurement and Analysis of TCP-Friendly Rate Control for Vertical Handovers”, ACM MCCR 8(3), pp. 73-87, Jul 2004.
- 43 H. Liao; L. Tie; Z. Du, “A Vertical Handover Decision Algorithm Based on Fuzzy Control Theory”, First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences, 2006. IMSCCS’06. pp. 309 - 313, Jun 2006.
- 44 Z. Zaidi, B. Mark, “A mobility-aware handoff trigger scheme for seamless connectivity in cellular networks”, 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. Vol 5, pp. 3471 - 3475, Sept 2004.
- 45 H. Attaullah, F. Iqbal, M. Javed, “Intelligent vertical handover decision model to improve QoS”, Third International Conference on Digital Information Management, 2008. ICDIM 2008. pp. 119 - 124, Nov 2008.
- 46 P. Khadivi, T. Todd, D. Zhao, “Handoff trigger nodes for hybrid IEEE 802.11 WLAN/cellular networks”, First International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, 2004. QSHINE 2004. pp. 164 - 170, 2004.
- 47 M. Yang, K. Cheon, A. Park, S. Kim, “3GE-WLAN Vertical Handover Experience using Fast Mobile IPv6”, 10th International Conference on Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008, pp. 1259 - 1262, Feb 2008.
- 48 Y. Hwang, A. Park, “Vertical Handover Platform over Applying the Open API for WLAN and 3G LTE Systems”, VTC 2008-Fall. IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008. pp. 1 - 5, Sep 2008.
- 49 H. Choi, D. Cho, “Takeover: a new vertical handover concept for next-generation heterogeneous networks”, 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. pp. 2225 - 2229, Jun 2005.
- 50 K. Jang, B. Shin, D. Hong, “Fast vertical handover utilizing sleep mode in WLAN and WiMAX heterogeneous networks”, 14th Asia-Pacific Conference on Communications, 2008. APCC 2008. pp. 1 - 5. Oct 2008.

CURRÍCULO

Carlos Andrés Ríos López. Ingeniero de Sistemas de la Universidad del Valle, Cali. Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia y candidato a Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Actualmente consultor vinculado a la empresa de soluciones de software para telco y utilities Open Systems Ltda., apoyando a las empresas EPM y UNE. ☀