



# Sistema de balance de carga para redes malladas inalámbricas multi-interfaces

*Christian Köbel, Walter Baluja García, Joachim Habermann*

## RESUMEN

Las redes malladas inalámbricas, basadas en las normas 802.11, fueron desarrolladas inicialmente con propósitos militares pero actualmente se han desplegado ampliamente en redes de usuario final e industriales. Desde hace más de diez años se realizan investigaciones en esta área. Sin embargo, los temas de enrutamiento y de calidad de servicio (QoS) no están agotados, sobre todo tomando en consideración que el tamaño de las nubes y backbones mesh ha crecido considerablemente. En estas condiciones puede ser muy beneficioso introducir nodos con múltiples interfaces inalámbricas, lo cual no representa grandes costos, por lo que el tema ha atraído el foco de atención de múltiples investigaciones en la actualidad. Esta posibilidad introduce entonces la necesidad de emplear métodos más complejos para estas redes, como el balance de carga y la asignación de canales, incluyendo la posible combinación de interfaces en cada nodo de la red. El presente artículo propone un sistema para implementar los aspectos mencionados arriba entendiéndose, proveer diversos modos de balance de carga, considerando la posibilidad de asignar canales y de combinarlos en la comunicación entre nodos mesh. Esto redundará en una gestión mucho más eficiente de los recursos de las redes malladas inalámbricas. Se describen los componentes y funcionalidades más novedosos del sistema propuesto, los cuales están distribuidos en cada nodo, y se ubican en una capa intermedia entre la de enlace y la de red. Por último se presentan los resultados de las simulaciones del sistema propuesto en escenarios concretos.

**Palabras claves:** Asignación de canales, balance de carga, combinación de canales, multi salto, nodos multi interfaces, redes ad-hoc, redes malladas inalámbricas.

## ABSTRACT

*Wireless mesh networks based on IEEE 802.11 have been initially designed for military purposes, but recently have been deployed widely in customer-based and industrial networks. For more than 10 years wireless mesh networks are in the focus of investigation. Still, topics on routing and quality of service (QoS) are constantly investigated and improved, especially since current wireless mesh hardware allows bigger and highly scalable mesh clouds (e.g., backbone networks). Independently of the application of mesh technology, the deployment of multi-interface nodes offers advantages in terms of capacity and network efficiency. Decreasing prices for wireless hardware benefit this trend. But multi-interface mesh networking generally comes with the cost of a higher system complexity. Especially load balancing and channel assignment have to be carefully adapted. In the presented paper a system which implements the above mentioned aspects is proposed. It includes diverse load balancing modes, taking the possibility of channel assignment algorithms into account. Included interface bundling management results in a more efficient usage of resources. Regarding components and their functionalities are described. An evaluation of the introduced system is provided in form of measurements in different mesh scenarios.*

**Key words:** Channel bundling, channel assignment, load balancing, multihop, multinterfases, ad-hoc networks, wireless mesh networks (WMN).

*A system for load balancing in multi-interface wireless mesh networks*

## INTRODUCCION

Las redes inalámbricas *ad-hoc* utilizan interfaces de red (*Wireless Network Interface Cards*, WNIC) IEEE 802.11 empleadas habitualmente en redes inalámbricas locales (*Wireless Local Area Network*, WLAN). Se caracterizan por su movilidad y el no empleo de puntos de acceso, pues permiten la comunicación directa entre nodos inalámbricos, entre otros aspectos que le garantizan flexibilidad y escalabilidad al sistema.

Las redes malladas inalámbricas son un subconjunto dentro de las redes *ad-hoc*, caracterizadas por la poca o ninguna movilidad de sus nodos, y los potentes recursos de hardware en cuanto a procesamiento, memoria y energía. Los nodos típicos de estas redes son laptops, computadoras personales entre otros, lo cual puede incluir dispositivos propietarios como nodos orientados a la conformación de *backbones* inalámbricos. El hardware más moderno permite incluir esquemas más sofisticados de enrutamiento y de gestión de tráfico en los nodos.

Con respecto a los roles, funcionalidades y limitaciones de los nodos de una red mallada existen múltiples definiciones en la bibliografía. La Tabla 1 ofrece un acercamiento a este tema.

**Tabla 1.** Tipos de nodos en las mallas inalámbricas (*mesh nodes*)

Tipo	Descripción	Movilidad	Soporte <i>Ad-hoc</i> /Multi-salto	Soporte multi interface
Router ( <i>Mesh Router</i> )	Cualquier nodo en un <i>backbone</i> mallado.		✓	✓
Punto de acceso ( <i>Mesh Point</i> )	Punto de acceso ( <i>HotSpot</i> ) que agrupa clientes en modo infraestructura		✓	✓
Router de borde ( <i>Edge Router</i> )	Nodo con acceso a redes externas, típicamente a redes de usuarios de Internet.		✓	✓
Gateway (Gateway Router)	Nodo con acceso directo a Internet o a otras redes externas.		✓	✓
Cliente	Cliente local de un punto de acceso.	✓		

Las redes malladas inalámbricas basadas en nodos de una sola interface permiten implementar un gran número de escenarios. En términos de la introducción de la tecnología *mesh* y del posible papel de sus nodos en una red de telecomunicaciones de área amplia, Akyildiz et. al. [1] propone una clasificación general. Los autores distinguen entre una red mallada híbrida (*Hybrid WMN*) y una red con arquitectura de infraestructura más *backbone*. En el primer caso los nodos están presentes en los niveles de *backbone* y de clientes. En el segundo el *backbone* consiste en un grupo de nodos *mesh* (routers) y su nivel de jerarquía está separado del nivel de los clientes. Los clientes simplemente se conectan a puntos de acceso locales que permiten la conexión de entrada al *backbone*.

En el presente trabajo los nodos se agrupan en un único nivel jerárquico que puede representar un *backbone* o una red cliente *peer-to-peer*. Los tipos de nodos que se utilizan están marcados en naranja en la Tabla 1. Los Router de borde y los Gateway cumplen el mismo papel en este caso, atendiendo a su relevancia como próximos saltos de la red.

Las redes malladas tienen numerosas aplicaciones. En escenarios de recuperación de desastres, militares o de comunicación de autoridades públicas (bomberos, policía, defensa civil), entre otros, se requiere una infraestructura muy robusta que ofrezca confiabilidad. Por otra parte, en aplicaciones de usuarios, frecuentemente se intercambia recursos de multimedia. Ambos sistemas deben considerar la introducción de esquemas de calidad de servicio (QoS).

Una red de acceso metropolitana (*backbone*) debe incluir características de los dos casos mencionados arriba. Esta diversidad de topologías, propósitos y aplicaciones ha derivado en varios protocolos de enrutamiento para redes malladas y/o *ad-hoc*. Sin embargo, en la capa de enlace se mantiene el hardware compatible con WLAN 802.11.

Por otra parte, a diferencia de los nodos de una única interface, el equipamiento multi interface permite trabajar aspectos como la gestión de reservación-asignación de canales y el balance de carga, con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los diferentes tipos de redes malladas. A partir de la necesidad de utilizar múltiples interfaces WLAN en un nodo y de soportar diversas aplicaciones de las redes malladas, el presente trabajo introduce modos predefinidos para optimizar el balance de carga (*LB-modes*) buscando una mejor calidad del servicio. Cada *LB-mode* selecciona la interface (WNIC) que será utilizada para transmitir el siguiente paquete (en el caso de que estuvieran disponibles varias interfaces para la comunicación con el próximo salto). Esta es una decisión que se toma para cada paquete, en cada comunicación *unicast*. Cuando se trata de una comunicación por difusión (*broadcast*) se transmitirá una copia del paquete por cada interface.

Adicionalmente, se concibe el empleo de un canal de control, para el intercambio de este tipo de paquetes de forma diferenciada

del tráfico de datos. Este canal pudiera ser empleado para el intercambio de información sobre el trabajo y configuración de los *LB-modes*.

## TRABAJO RELACIONADO

La selección inicial de los modos de balance de carga fue inspirada por el *Linux Ethernet Bonding Driver* [2], que ya existe en las redes cableadas sobre sistemas Linux. Haciendo modificaciones en el *kernel* se hace trabajar varias tarjetas Ethernet como si fuera una sola. Una funcionalidad importante del *Ethernet Bonding Driver* es la gestión de las direcciones IP y MAC de las tarjetas. Dentro del grupo de interfaces combinadas se elige una sola dirección MAC e IP. Así se puede identificar un host en la red a través de una sola dirección en las capas de red y de enlace, lo cual reduce la complejidad del enrutamiento entre otros aspectos. El sistema presentado en este trabajo aplica un método similar para las redes malladas inalámbricas, de forma que para direccionar un nodo, se eligen las direcciones IP/MAC de su primera interface.

Kim et. al. [3] han desarrollado el framework MIMC-SIM, que es un sistema genérico y flexible para simular redes malladas con nodos multi interfaces y con acceso a múltiples canales a la vez. De forma similar al sistema introducido en este artículo, aquel grupo ha diseñado una capa intermedia entre las capas de enlace y de red, que controla la gestión de los canales en las interfaces. La estructura de su sistema no se enfoca en el balance de carga, sino en proveer un framework para implementar y evaluar diferentes protocolos de asignación de canales (AC).

Kim et. al. analizan diferentes aspectos de los algoritmos AC. MIMC-SIM da soporte fundamentalmente a dos tipos de algoritmos. El primero es *node-based*. Aquí cada nodo recibe un grupo de canales asignados del modulo AC para comunicarse con sus vecinos. Ese método se aplica para el sistema presentado en este artículo. Antes de distribuir tráfico a través las interfaces combinadas, se determina el canal de cada interface a partir de una tabla, que debe ser creada por un modulo de AC externo. El segundo tipo de algoritmo AC es *link-based*. En este caso se distingue entre los tráficos de entrada y de salida para la asignación de canales con cada vecino.

Este grupo de trabajo también identifica algunos problemas básicos del simulador OMNeT++ [4] en combinación con INETMANET [5]. El INETMANET soporta el uso de múltiples interfaces por nodo, pero con la gran limitación de que se pueden comunicar por un solo canal. También, INETMANET permite que los canales ortogonales que estén siendo utilizados no causen interferencia entre sí. Sin embargo, en ciertos casos existe un comportamiento indeseable cuando dos nodos dentro del mismo rango de interferencia y que usan dos tecnologías de acceso diferentes en el mismo canal físico (por ejemplo, IEEE 802.11 *Wireless LAN* y IEEE 802.15.4 *ZigBee*), no producen interferencia al transmitir simultáneamente. Rectificar este mal funcionamiento es un logro importante del grupo de Kim et. al.

## MODOS MULTI PROPÓSITO DE ORDENAMIENTO DE PAQUETES

En esta sección se ofrece una breve descripción de cada modo de balance de carga propuesto (*LB-modes*). Es importante mencionar que los modos definidos se refieren a la distribución de carga dentro de un mismo *bundle* (grupo de canales combinados entre dos nodos que se emplean simultáneamente para intercambiar información, permitiendo utilizar un mayor ancho de banda [6]). Cada *bundle* puede transportar un flujo diferente de paquetes en cada momento.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los modos de trabajo del balance de carga que se proponen. Son aplicables para tráfico *unicast* y *multicast*.

**Tabla 2.** Resumen de los Modos de Balance de Carga propuestos

No.	Modos de Balance de carga	Siglas	Aporte/Escenarios	Parámetros de entrada
1	Round-Robin	RR	Mejora el empleo del espectro de frecuencia 802.11. Aplicable a cualquier escenario.	Ninguno
2	Control de fallos	FC	Separa o aísla las redes que confrontan niveles elevados de interferencia o de ruido en los canales del estándar. Por ejemplo, el surgimiento espontáneo de un <i>backbone</i> con numerosos usuarios externos, lo cual crea mucho tráfico de fondo. Una red mallada con Control de fallos es menos propensa a la interferencia en los canales compartidos o adyacentes.	Nivel de colisiones de la capa de enlace
3	Redundante	RD	Mejora la estabilidad, robustez y disponibilidad de las conexiones dentro de la malla. Se aplica en redes de emergencia en escenarios de desastres.	Ninguno
4	Adaptativo	TP	Mejora la calidad de la transmisión de contenidos de audio y video para flujos basados en protocolo UDP ( <i>User Datagram Protocol</i> ). Se aplica en redes de usuario final, como las domésticas.	Campo Protocolo de la cabecera IP
5	<i>Weighted-Fair-Queuing</i> (sistema de colas equitativo ponderado)		Mejora el empleo del espectro de frecuencia 802.11. Se adapta a variaciones del estado de enlace. Aplicable en cualquier escenario.	Estado de enlace de cada interface
6	Transmisión y Recepción independientes		Separa el tráfico o los flujos en cada sentido de la comunicación. No tiene un escenario específico de aplicación.	Ninguno

### Modo Round-Robin

Se aplica un mecanismo simple de Round Robin tradicional. Asume que existen un número de interfaces disponibles en un *bundle* ( $numInterfaces$ ). Cada interface tiene asignado un número que la identifica ( $i$ ) y que se almacena en el arreglo *Available\_Interface* [ $numInterfaces$ ]. *Available\_Interface* [ $n$ ] identifica la interface a utilizar, donde  $n$  se encuentra en el rango entre 0 y  $numInterfaces - 1$ .

Para cada paquete *unicast* se asigna una interface por la cual enviarlo, *Available\_Interface* [ $n$ ]. El valor  $n$  se incrementa luego de la transmisión, mientras no exceda el valor de  $numInterfaces$ . De esta forma los paquetes son distribuidos entre todas las interfaces del *bundle*. La frecuencia de conmutación ( $fc$ ) puede ser especificada a un valor por encima de 1 paquete. Esto implica que se transmitirán  $fc$  paquetes antes de seleccionar la próxima interface a utilizar dentro del *bundle*.

### Modo de Control de fallos

La principal causa de pérdida de paquetes en redes inalámbricas (WiFi) de gran tamaño es la interferencia de radio en el mismo canal o en canales adyacentes al que se utiliza para la comunicación [7]. El objetivo de este modo de trabajo es evitar este tipo de errores para un canal determinado. El procedimiento se ejecuta de forma proactiva, antes de transmitir los datos. Se toma en consideración la cantidad de paquetes enviados ( $num_{Sent}$ ) y el número de colisiones ( $num_{Collisions}$ ) de la capa de enlace. El valor de  $num_{Collisions}$  se obtiene habilitando el empleo de los paquetes ACK (*acknowledgements*) de la capa de enlace y colocando el número máximo de retransmisiones en 4 (valor por defecto). Se calcula entonces el nivel de colisiones para cada interface con la siguiente expresión:

$$rate_{Collision} = \frac{num_{Collisions}}{num_{Sent}}$$

Se emplean las mismas variables que en el modo Round Robin en lo concerniente a las interfaces dentro del *bundle*. En este caso la interface de transmisión no se cambia a menos que  $rate_{Collision}$  sobrepase determinado umbral. La interface utilizada inicialmente se denomina *main*, la cual es prefijada a un canal determinado en cada nodo. El parámetro  $rate_{Collision}$  es chequeado para cada paquete a procesar. Cuando el umbral es sobrepasado, se incrementa  $n$  y se selecciona la siguiente interface para transmitir. En este momento varían los parámetros de calidad del enlace de las capas 1 y 2 (relación señal ruido, paquetes perdidos, paquetes con error, nivel de retransmisiones, entre otros).

El valor del umbral es variable, en las mediciones realizadas en este trabajo se ha utilizado un valor de 3% [8].

### Modo Redundante

Apuesta por introducir la redundancia en la transmisión. Con el objetivo de incrementar la estabilidad y la confiabilidad de la red se utilizan todos los canales disponibles. Esto implica que se transmita el mismo paquete por todas las interfaces disponibles en el *bundle*. En este caso los paquetes *unicast* y *broadcast* reciben un tratamiento similar. Además, no se requiere controlar los parámetros relativos a la calidad del enlace en las interfaces o los canales, como se hace en el resto de los modos.

### Modo Adaptativo

La organización o planificación del envío de paquetes se acomoda a los dos principales protocolos de transporte utilizados en las redes de datos: UDP y TCP (*Transmission Control Protocol*). Puede compararse con el modo Round Robin, pero se realiza una diferencia entre los paquetes TCP (Datos y control) y los paquetes UDP. Se aplica Round Robin para cada grupo de canales, un grupo está dedicado a paquetes TCP y otro a paquetes UDP. Esa distribución de canales se realiza partiendo de las estadísticas de los paquetes transmitidos en el nodo hasta ese momento.

Se extrae la información del protocolo de transporte de la cabecera IP (*Internet Protocol*) de cada paquete. En las pruebas realizadas hasta ahora se han empleado las interfaces con identificadores pares para los paquetes TCP ( $n \bmod 2 = 0$ ) y las impares para UDP ( $n \bmod 2 = 1$ ). El resto de los paquetes se transmiten por la interface  $n = 1$ .

### Modo Weighted-Fair-Queuing

Se aplica el principio de tratamiento de colas WFQ [9]. WFQ se emplea para organizar los paquetes y asignarlos a las interfaces de acuerdo a las capacidades que tienen para transmitir. Puede ser visto como un Round Robin avanzado, ya que toma en cuenta la calidad de los enlaces a partir de las métricas de los protocolos de enrutamiento de la red mallada.

En este caso se trata de un *ancho de banda residual* del enlace. En comparación con el esquema de *Strict Priority*, WFQ ofrece la ventaja que no desecha interfaces con residual pequeño. WFQ está diseñado para asignar prioridad de envío ante múltiples flujos que deben transmitirse utilizando el mismo canal o enlace de salida. En la presente propuesta a la entrada del sistema solo se considera el tamaño total del paquete, no se prioriza de acuerdo a niveles de QoS. Se asigna un peso o prioridad relacionado directamente con los valores de los estados de los enlaces, por lo que WFQ asignará más paquetes a las interfaces de mejores características (menor costo de enlace) dentro del *bundle*. Por esta razón, se emplea una tabla de prioridad o peso de interface *Interface Weight Table, IWT*. Se asigna entonces un factor individual de peso  $w_i$  ( $0 \leq w_i \leq 1$ ) a cada interface, basado en la calidad de su enlace.

Para determinar por dónde enviar el paquete, se introduce un contador para cada interface. Se emplea una ventana de  $window_{WFQ}$  paquetes. Si el costo de un enlace es más bajo, el porcentaje de paquetes de  $window_{WFQ}$  que se debe mandar sobre esa interface será más alto. Con cada paquete enviado a través de una interface, su contador se decrementa en uno. Si el contador llega a cero, se empleará la próxima interface para transmitir paquetes. La transmisión comienza por la interface con el costo de enlace más bajo para cada ciclo de paquetes  $window_{WFQ}$ .

### Empleo de un Canal de Control

Se ha concebido la posibilidad de incluir una interface para un Canal de Control, lo cual resulta relativamente fácil en una red mallada multi interface. Cada nodo podrá tener una interface fija designada para transmitir o recibir información de control. Adicionalmente, se reservará un canal para este tipo de intercambio. Los nodos que no tengan interfaces suficientes podrán transmitir esta información utilizando cualquier interface, pero siempre por el mismo canal.

Este tipo de estrategia permite separar la transmisión de datos y de señalización, organizar el uso de información de control y facilita la incorporación de nuevos nodos a la red mallada. Puede incluir la transmisión de información de control incluso de niveles superiores, identificándolos a partir de la cabecera de los paquetes.

## SOLUCIÓN DE LA CAPA INTERMEDIA Y COMPONENTES MODIFICADOS

Para implementar los modos de balance de carga descritos en la sección anterior se introduce la arquitectura general del sistema propuesto que se muestra en la Figura 1. Los componentes en gris representan elementos que ya existen en la suite de protocolos IP / IEEE 802.11. Los componentes en verde contienen elementos del proceso de asignación de canales el cual se encuentra en un estado preliminar [10]. La gestión de múltiples interfaces y la distribución de paquetes entre ellas están incluidas en los componentes en naranja. El tráfico o flujo de paquetes que sale del nodo local (1 en la Figura 1) puede contener paquetes *unicast*, *multicast* o *broadcast*, creado en capas superiores o reenviados por la capa IP. El flujo de paquetes que entran al nodo local (2 en la Figura 1) puede contener paquetes destinados al nodo local o paquetes que serán reenviados. Seguidamente se explican los detalles de cada componente.

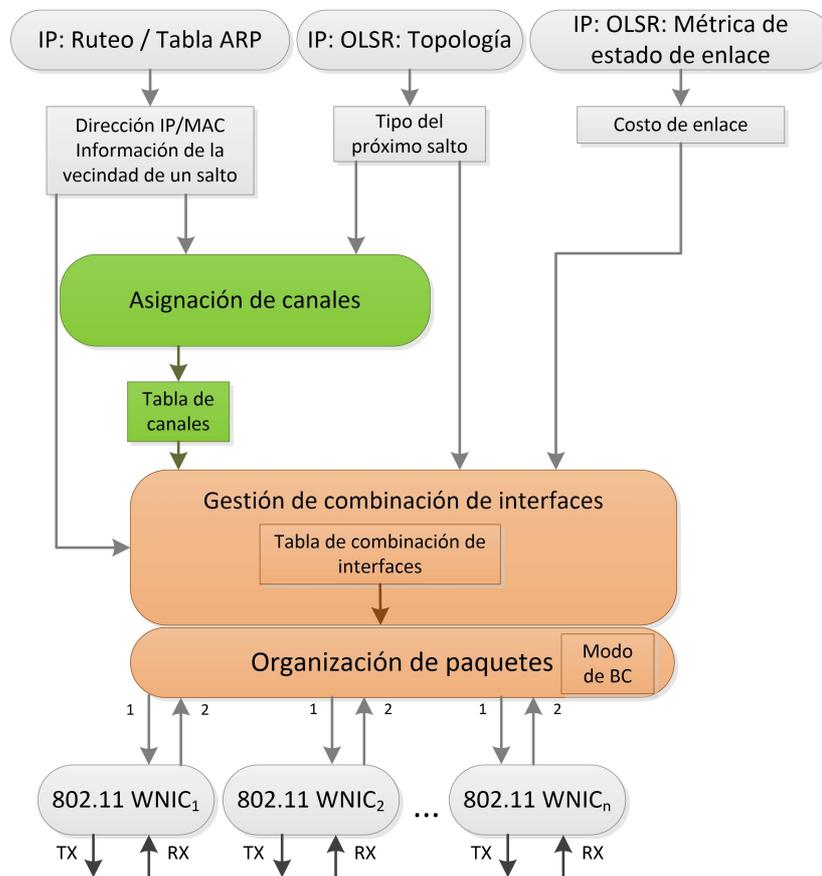


Figura 1

Arquitectura general del sistema propuesto.

### 1.1. Información Requerida de la Capa de Red

#### Costo del Enlace

Cada implementación del protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [11] contiene una o varias métricas para el enrutamiento de las cuales se puede extraer la información relativa a la calidad de los enlaces. En el caso de OMNeT++ [4], el módulo de software OLSR incluye la métrica de conteo de saltos (*Hop Count*), la *Expected Transmission Count* (ETX) y la

*Expected Transmission Time* (ETT) [12]. Para este trabajo, se aplica la métrica  $ETT_{SCLA}$  [13], que está basada en la métrica ETT: en lugar de incluir solamente el ancho de banda que ofrece un enlace, se calcula la diferencia entre el ancho de banda máximo y el ancho de banda actual. Como ETX y ETT,  $ETT_{SCLA}$  está basado en la comprobación activa del enlace, usando pequeños paquetes propios para determinar el estado de enlace.

### Distinción de los Tipos de Nodos del Próximo Salto

A través del protocolo de enrutamiento OLSR, cada nodo es capaz de construir la topología completa de la red mallada inalámbrica. La topología está guardada en forma de información sobre la conectividad entre nodos y el estado de enlace de cada conexión entre dos nodos vecinos. Desde el punto de vista del nodo local es muy importante conocer la información sobre el tipo del nodo del próximo salto. El tipo de nodo se distingue entre las variantes (Ver Tabla 1):

1. Vecino con acceso directo al Internet (nodo Gateway)
2. Vecino, que tiene un nodo Gateway en su vecindad a un salto. En otras palabras, un vecino que forma parte de la ruta a un Gateway
3. Vecino regular (Router)

La prioridad entre los vecinos a un salto coincide con la lista anterior, la prioridad más alta se asigna a los vecinos del grupo 1. La información sobre el tipo del próximo salto se utiliza en la gestión de la combinación de interfaces (*bundles*).

### Direcciones IP y MAC

De la tabla de rutas y de la tabla ARP se extraen las direcciones IP y MAC de cada interface utilizada en la vecindad de un salto del nodo local.

## **1.2. Módulo de la Capa Intermedia**

Como se ha mencionado, los componentes novedosos del sistema se ubican en una capa intermedia entre la capa de enlace y la de red. Como el sistema usa además componentes de esas capas, se puede clasificar como un sistema *cross layer*. Cada componente se añade a cada nodo con múltiples interfaces en la red mallada. En esta etapa de investigación los componentes que se han desarrollado implementan la asignación de canales (en verde en la Figura 1) y el balance de carga en la comunicación con un vecino a través de un *bundle* (componente naranja en la Figura 1).

### **1.2.1. Funcionalidad de la Asignación de Canales**

El sistema presentado no define un algoritmo concreto de asignación de canales (AC), aunque se trabaja en uno de forma paralela a esta investigación [10], pero define el producto de un algoritmo AC en forma de tabla. Así el sistema está abierto para utilizar una variedad de algoritmos de asignación de canales, siempre que ofrezcan la salida que se necesita. Generalmente, el algoritmo AC debe aprovechar todos los recursos de un nodo o, lo que es lo mismo, todas las interfaces 802.11 instaladas. Además de aprovechar el número de interfaces disponibles, todos los canales disponibles a través de cada interface deben ser identificados. Un algoritmo AC puede trabajar proactivamente, que significa distribuir los canales antes de una transmisión, o reactivamente, que significa adaptar la asignación de canales durante una transmisión. El algoritmo AC que se aplique en el sistema propuesto debe considerar el tipo de nodo del próximo salto en el proceso de la selección y asignación de canales, y otorgar la prioridad de acuerdo a lo comentado anteriormente en la sección 4.1. La salida del modulo AC debe especificar qué canales puede usar el nodo local con cada uno de sus vecinos.

### **1.2.2. Gestión de la Combinación de Interfaces (gestión de *bundles*)**

El modulo de gestión de la combinación de interfaces tiene varias tareas. Debe tomarse en consideración que la implementación de *bundles* es un mecanismo proactivo, los *bundles* existen entre los nodos aún cuando no hay tráfico para transmitir. Este módulo determina:

1. La cantidad de *bundles* que hay que formar con cada vecino: el nodo local tiene en cuenta las direcciones IP fuente y destino de cada paquete. Para cada par de flujos de paquetes (un flujo para cada dirección entre una fuente y un destino), se crea un *bundle*. Es posible, que un nodo comparta múltiples *bundles* con un solo vecino.

2. La cantidad de interfaces a usar en cada *bundle*. La decisión está basada en la prioridad del próximo salto (ver 4.1). Adicionalmente, si existe la información de una *sesión* entre dos nodos (IP fuente, IP destino, puerto fuente, puerto destino, y el protocolo de transporte usado) la asignación de la cantidad de interfaces puede ser calculado de forma más exacta. En este caso, un *bundle* es usado exclusivamente para una sesión.
3. Asignar el canal que será utilizado en cada interface dentro del *bundle*, de acuerdo a la información de la tabla salida del algoritmo AC. No todos los canales asignados en la tabla AC tienen que ser usados con el vecino correspondiente.
4. Repetir los pasos 1-4 cíclicamente.

### 1.2.3. Organización de los Paquetes (*packet scheduling*) y Balance de Carga

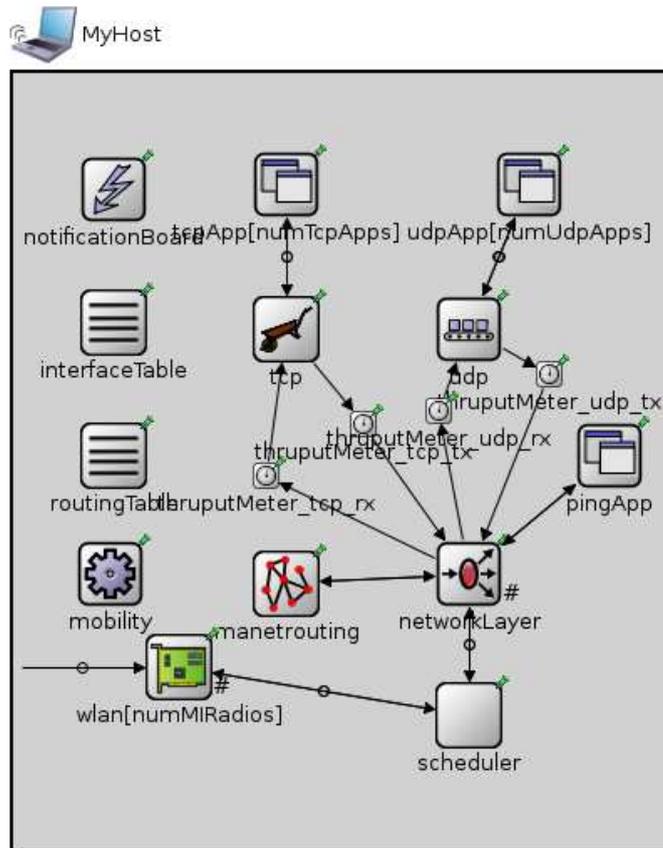
En el módulo de la organización de paquetes se realiza la distribución de paquetes según el modo de balance de carga elegido (Ver Tabla 2). Se implementan las funcionalidades descritas para cada modo. Este módulo no adiciona una cola de paquetes extra, sino que los atiende en la medida en que van llegando. La interface que se utilizará para la transmisión se elige para cada paquete individualmente.

### 1.3. Modificación de la Capa de Enlace (MAC)

Para el modo de balance de carga con el número 2, Control de Fallos, es necesario obtener el parámetro  $num_{Collisions}$  de la capa MAC. Por tal motivo, en la implementación del sistema presentado es necesario extraer este valor dinámicamente y hacerlo visible para el módulo descrito en la sección 4.2.

## IMPLEMENTACIÓN EN OMNET

El sistema descrito fue implementado en el simulador de eventos discretos OMNeT++. El trabajo más intenso estuvo en la introducción de los elementos de la capa intermedia del sistema. Para incluir los protocolos comunes de la suite IEEE 802.11 y TCP/IP, se trabajó con el framework INETMANET [5] como base. Dentro de INETMANET, se decidió utilizar el tipo de nodo *MobileManetRoutingHost* para luego incluirle los módulos con las funcionalidades y características descritas hasta el momento. El resultado se muestra en la Figura 2.



**Figura 2**  
**Estructura modificada del nodo usado en INETMANET.**

Otro elemento añadido al tipo de nodo *MobileManetRoutingHost* fue la capacidad de utilizar múltiples interfaces, aspecto esencial para el sistema descrito en este trabajo. A través del parámetro *numMIRadios* se pueden especificar la cantidad de interfaces utilizadas en cada nodo. La funcionalidad de la organización de paquetes (*packet scheduling*), según el modo de balance de carga elegido (Ver Tabla 2), se encuentra implementada en el nuevo módulo *scheduler*, que se ejecuta entre la capa de red (*networkLayer*) y las interfaces inalámbricas (*wlan[numMIRadios]*).

## MEDICIONES REALIZADAS

Durante las mediciones realizadas en dos escenarios diferentes se comprobó el desempeño de una misma topología conformada por nodos (sihost) de una sola interface inalámbrica y conformada luego por nodos (mihost) de cuatro interfaces inalámbricas (en las figuras 3, 4 y 5 se muestran las topologías en este último caso). En las mediciones con nodos multi interfaces se decidió emplear el mismo grupo de canales en cada nodo. La asignación de estos canales se realizó manualmente a través de las facilidades de configuración del OMNeT. Se utilizó el protocolo de enrutamiento OLSR para mallas inalámbricas, el mismo que se ha venido utilizando en toda la investigación.

El primer escenario sobre el que se realizaron mediciones contiene una cadena simple de cuatro nodos (Figura 3). El nodo 0 transmite dos flujos (uno TCP y uno UDP) de forma simultánea hacia el nodo 3. En la Figura 4 se puede ver una variante de este escenario, donde se incluyen 6 nodos extras que intercambian tráfico de “fondo”, el cual consiste en tres flujos TCP que se envían desde los nodos 4, 5 y 6 hacia los nodos 7, 8, y 9 respectivamente.

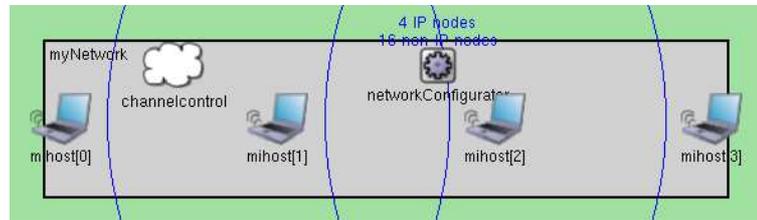


Figura 3

Escenario de Prueba 1-1: Cadena de nodos.

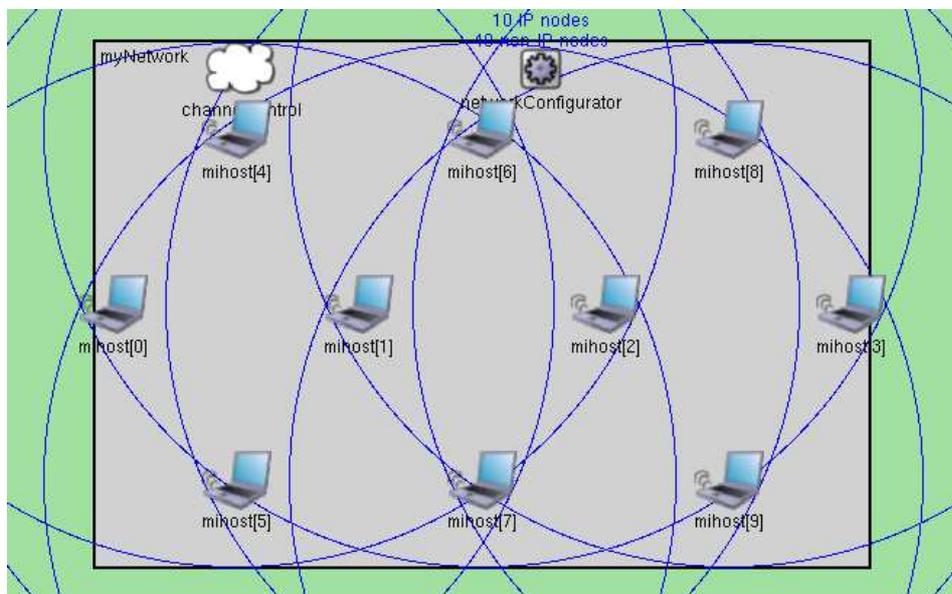
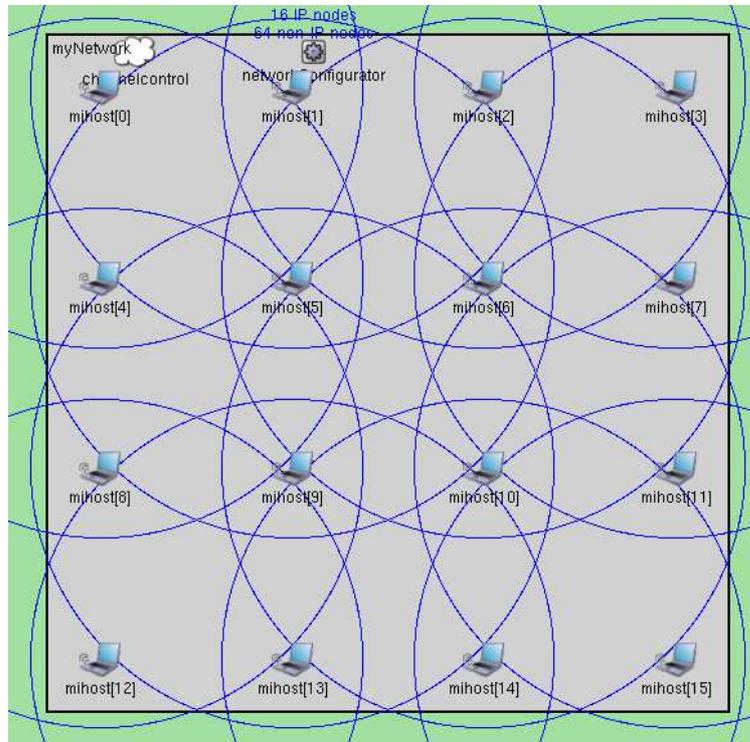


Figura 4

Escenario de Prueba 1-2: Cadena de nodos con tráfico de fondo.



**Figura 5**

**Escenario de Prueba 2: Malla de nodos**

La Figura 5 muestra el segundo escenario utilizado. En este caso, se emplea una malla de 16 nodos. Nuevamente, se evalúan dos flujos de TCP y UDP (ancho de banda de transmisión: 1 Mbit/s), que se envían simultáneamente desde el nodo 0 hacia el nodo 15. En una segunda versión del escenario, se introducen tres flujos de tráfico TCP de fondo, enviados desde los nodos 1, 3 y 11 hacia los nodos 4, 12 y 14.

Los resultados de los dos escenarios simulados y sus variantes se muestran en las Figuras 6 y 7. Se compara el desempeño de las variantes con nodos de una interface y los de cuatro interfaces, los cuales aplican los modos de balance de carga Round-Robin, Control de Fallos y Adaptivo, los únicos implementados hasta el momento.

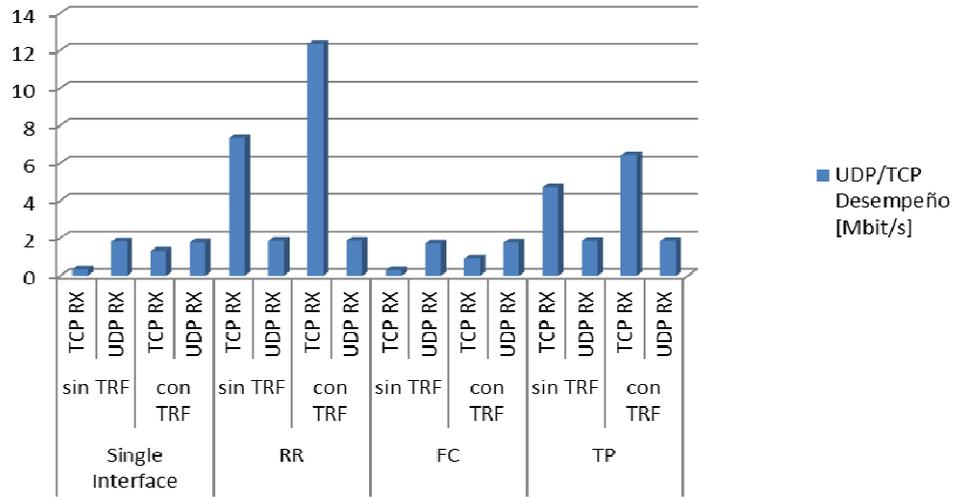


Figura 6

Resultados de los Escenarios 1-1 y 1-2 (Cadena de Nodos)

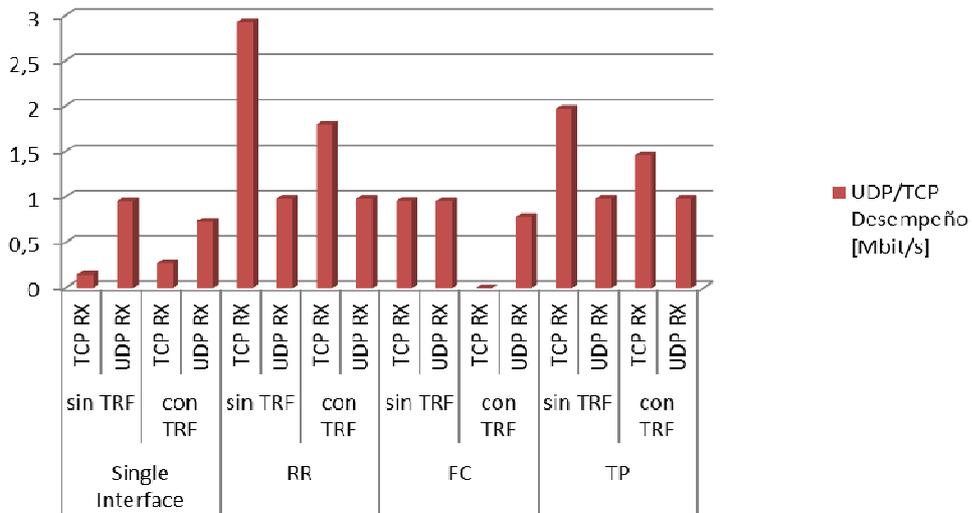


Figura 7

Resultados del Escenario 2-1 y 2-2 (Malla de Nodos)

Los resultados obtenidos con los nodos de múltiples interfaces son visiblemente mejores en comparación con los nodos convencionales, lo cual es un resultado a esperar y que debe ser mucho más evidente cuando los niveles de tráfico crecen. En cuanto a los modos de balance de carga comprobados, generalmente el modo Round-Robin ofrece la mejor respuesta de desempeño, especialmente en el segundo escenario. Debe tomarse en consideración que las mediciones han sido realizadas sobre escenarios y ejemplos de tráfico muy básicos. Adicionalmente, puede señalarse que de forma general para el tráfico TCP se obtienen los mejores desempeños a excepción del modo de Control de Fallos, sobre el cual deberá revisarse la opción de modificar el parámetro decisor del algoritmo.

## CONCLUSIONES

En el artículo presentado se propone un sistema de balance de carga para redes malladas inalámbricas, que aprovecha la asignación de canales y la combinación de interfaces para proporcionar una mejor calidad de servicio. Este sistema permite gestionar de forma mucho más eficiente los recursos de los nodos en las redes malladas inalámbricas multi interfaces. El sistema tiene su núcleo en una capa intermedia entre las capas de red y de enlace, y utiliza algunas facilidades existentes en esas capas, por lo que constituye una solución *cross-layer*.

Los diferentes modos de trabajo propuestos, aunque no agotan todas las posibilidades, son aplicables en diversos escenarios. Para alcanzar el balance de carga de acuerdo los modos de trabajo introducidos, el sistema contiene elementos para la gestión de combinación de interfaces y la gestión de las direcciones IP y MAC de las interfaces.

Hasta el momento, los resultados de las mediciones de los modos que se simularon muestran que el modo Round-Robin es el más efectivo en términos de desempeño (*throughput*). No obstante, debe continuarse trabajando en la comprobación y refinamiento de todos los modos presentados.

Dentro del trabajo de futuro se tomarán en consideración parámetros adicionales como la prioridad del tráfico, en favor de la calidad de servicio. Además, se investigará en los efectos de los modos presentados en rutas multi-salto.

## REFERENCIAS

1. **I. F. Akyildiz and Xudong Wang:** "A survey on wireless mesh networks", IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, pp. S23–S30, Sep. 2005.
2. Linux Ethernet Bonding Driver, <http://www.kernel.org/doc/Documentation/networking/bonding.txt>
3. **H. Kim; Q. Gu; M. Yu; W. Zang; and P. Liu:** "A simulation framework for performance analysis of multi-interface and multi-channel wireless networks in INET/OMNET++," in Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference, Orlando, Florida, 2010, pp. 101:1–101:8.
4. "OMNeT++ Network Simulator Framework", <http://www.omnetpp.org>
5. "INETMANET Framework", <https://github.com/inetmanet/inetmanet/blob/master/README.INETMANET>
6. **Kobel, C.; García, W.B.; Habermann, J.; Bayer, N.; Sivchenko, D.;** "Dynamic channel bundling in 802.11a based media-transport mesh networks," Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE , vol., no., pp.979-980, 9-12 Jan. 2011
7. **A. Sheth; S. Nedeveschi; R. Patra; S. Surana; E. Brewer; and L. Subramanian:** "Packet loss characterization in WiFi-based long distance networks," in INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2007, pp. 312–320.
8. **I. Kozintsev and J. M. Veigh:** "Improving last-hop multicast streaming video over 802.11," Proceedings of BROADNETS, San Jose, California, USA, vol. 38, 2004.
9. **A.Parekh and R.Gallager:** "A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks- the multiple node case", in INFOCOM'93. Proceedings.Twelfth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Networking: Foundation for the Future. IEEE ,1993, pp. 521–530 vol.2.
10. **A. Fadruga:** "Diseño de algoritmo para la distribución dinámica de canales en redes malladas inalámbricas", Tesis de diploma, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 2012.
11. **T. Clausen and P. Jacquet:** "Optimized link state routing protocol (OLSR)," IETF Network Working Group RFC 3626, Oct. 2003.
12. **P. M. Esposito; M. Campista; I. M. Moraes; L. Costa; O. Duarte, and M. G. Rubinstein:** "Implementing the Expected Transmission Time Metric for OLSR Wireless Mesh Networks," in Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP, 2008, pp. 1–5.
13. **Christian Köbel; Walter Baluja García, and Joachim Habermann:** "Selective Link Cost Alteration in Reservation-Based Multi-Hop Wireless Mesh Networks", in ICN 2012: The Eleventh International Conference on Networks, IARIA, pp. 153-158, 2012.

## **AUTORES**

**Christian Köbel, Dipl.-Ing., Departamento de Telecomunicaciones, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), CP 11500 Marianao, La Habana, Cuba, [Christian.Koebel@iem.thm.de](mailto:Christian.Koebel@iem.thm.de)**

Estudiante de doctorado del departamento de Telecomunicaciones y Telemática del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, ISPJAE en La Habana, Cuba. Se graduó de ingeniero en Telecomunicaciones en el año 2008, en la Universidad de Ciencias Aplicadas THM, en Friedberg, Alemania. Su trabajo de doctorado se centra en la gestión dinámica de los recursos en las redes malladas inalámbricas. En paralelo realiza investigaciones sobre la sincronización de soluciones DVB/IP dentro del proyecto Europeo HBB-NEXT.

**Walter Baluja García, Prof. Dr.-Ing., Rectorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), CP 11500 Marianao, La Habana, Cuba, [Walter@Tesla.CUJAE.edu.cu](mailto:Walter@Tesla.CUJAE.edu.cu)**

Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), en La Habana (1997). Máster en Telemática (2000) y doctor en Ciencias Técnicas (2006) por la misma universidad. Profesor Auxiliar del departamento de Telecomunicaciones y Telemática del ISPJAE. Vicerrector del ISPJAE. Su actividad docente y de I+D se desarrolla, fundamentalmente, en la arquitectura y gestión de redes, especialmente en la gestión de seguridad. Sus trabajos actuales se ubican en la seguridad de protocolos y redes inalámbricas, y las normas y sistemas de gestión de seguridad en las redes de telecomunicaciones.

**Joachim Habermann, Prof. Dr.-Ing., Department for ICT, Electrical Engineering & Mechatronics, TH Mittelhessen University of Applied Sciences, D-61169 Friedberg, Germany, [Joachim.Habermann@iem.thm.de](mailto:Joachim.Habermann@iem.thm.de)**

Miembro Senior IEEE. Recibió su diploma de ingeniería y su grado de doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania. Trabajó en el departamento de Telecomunicaciones, en el área de comunicaciones móviles, del Centro de Investigaciones de la ABB en Baden, Suiza. Actualmente es profesor e investigador de la Universidad de Ciencias Aplicadas THM, en Friedberg, Alemania.