

# Capacidad de una red inalámbrica en malla, para el transporte de voz sobre IP y datos en un entorno rural\*

Diana Carolina Lozano  
dlozano@unicauca.edu.co

Julián Andrés Hurtado  
jahurtado@unicauca.edu.co

Guefry Agredo Méndez  
g.agredo@ieee.org

Student Members IEEE  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones  
Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia

Fecha de recepción: 19-10-2007

Fecha de selección: 18-04-2008

Fecha de aceptación: 14-01-2008

## ABSTRACT

This paper analyzes the effectiveness of VoIP in fixed mesh wireless networks considering the study of the standardization and performance of these types of networks and taking into account the instability of medium conditions from one node to another one which could affect the communication. The network capacity analysis is specifically focused in VoIP transport because it as an application that demands greater quality requirements than the ones required by data transmission. This is validated throughout

a specific design that is implemented for one of the micronetworks of the EHAS-Silvia Project and simulated on the National Chiao Tung University Network Simulator, NCTUns 3.0 that allows to verify its correct operation and to establish the maximum network capacity considering specific factors of mesh networks as the amount of jumps, increase of traffic and fall and establishment of routes.

## KEY WORDS

Wireless mesh network, VoIP, STP, G.729, NCTUns 3.0.

\* Manuscrito presentado ante I2COMM 2008, el 19 de octubre de 2007. Este trabajo fue financiado en parte por Unicauca en el marco de Desarrollo de la Maestría en Ingeniería. Área: Electrónica y Telecomunicaciones y el Grupo I+D GNTT.

## **RESUMEN**

En este artículo se analiza la efectividad que tiene el transporte de Voz sobre IP en las redes inalámbricas en malla fijas a partir del estudio del funcionamiento y estandarización de este tipo de redes, teniendo en cuenta que al pasar de un nodo a otro las condiciones del medio cambian y esto afecta la comunicación. El análisis de la capacidad de la red se centra específicamente en el transporte de VoIP al considerarse una aplicación que demanda requerimientos mayores de calidad que lo que pudiera necesitar un servicio como el acceso a Internet y se valida a través de un diseño específico implementado para una de

las microrredes del Proyecto EHAS-Silvia y su posterior evaluación en el Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung 3.0 (National Chiao Tung University Network Simulator, NCTUns 3.0) que permite comprobar su correcto funcionamiento y establecer la máxima capacidad de la red ante factores característicos de las redes en malla como lo son la cantidad de saltos, aumento de tráfico y caída y restablecimiento de rutas.

## **PALABRAS CLAVE**

Redes en malla, VoIP, STP, G.729, NCTUns 3.0.

**Clasificación Colciencias: Tipo 1**

## I. INTRODUCCIÓN

En Colombia existe una considerable brecha tecnológica entre las zonas urbanas y rurales que se evidencia principalmente porque en gran parte de la población rural la comunicación telefónica es escasa, costosa, deficiente e inclusive nula en los sitios más apartados. La mayoría de los sistemas de comunicación telefónica presentan una arquitectura lineal en la cual cada usuario tiene una conexión directa con una estación central que se encarga de atender la solicitud de llamada y realizar el proceso de conexión entre los usuarios. Este tipo de arquitectura funciona muy bien en áreas urbanas donde el desarrollo de la infraestructura vial facilita el proceso de la conexión, pero si dicha arquitectura se implementa en un entorno rural, su eficiencia tiende a disminuir debido a la dificultad de sobrepasar múltiples obstáculos presentes por las condiciones geográficas adversas, lo cual imposibilita el cubrimiento total de la zona con un solo trayecto.

Asimismo, los problemas de acceso a sitios tan remotos dificultan el mantenimiento preventivo y correctivo de estos sistemas y por lo tanto su funcionamiento, ya que en el momento en que se presenta una falla la comunicación se interrumpe por completo puesto que el sistema no tiene rutas alternas de envío de información y el tiempo de reparación de estas fallas puede tardar varios días.

Por otro lado, factores como la alta dispersión de la población y la baja capacidad de pago que se presentan en las áreas rurales limitan la implementación de los sistemas de comunicación que ofrecen las empre-

sas de telefonía tradicionales, pues la mayoría de estos sistemas requieren de una alta demanda para recuperar el valor de las inversiones realizadas en infraestructura y costo de mantenimiento, entre otros, debido a las dificultades de acceso.

Pese a que en el momento existen algunas soluciones de interconexión (en su mayoría realizadas con tecnologías satelitales) éstas no satisfacen completamente las necesidades requeridas, puesto que para implementarse efectivamente se necesitan inversiones muy altas que no pueden asumir las economías rurales y en otros casos carecen de las capacidades necesarias para llegar hasta los puntos más lejanos con grandes anchos de banda y sin retardos.

Las Redes Inalámbricas en Malla (*Wireless Mesh Network*, WMN) representan una alternativa viable para solucionar estos problemas de comunicación, pues, gracias a sus propiedades de rapidez de despliegue, facilidad de instalación, flexibilidad, autoconfiguración, autorreparación, escalabilidad, redundancia, bajo costo, entre otras, facilitan la interconexión de estos sitios apartados.

Esta tecnología poco a poco empieza a ganar credibilidad hasta el punto que grandes compañías del mercado ya ofrecen soluciones de interconexión inalámbrica en malla, lo cual evidencia la necesidad de trabajar por la estandarización de estas redes para que puedan desplegarse por todo el mercado con mayor eficiencia y economía. Es así como dentro del IEEE se han formado diferentes grupos de trabajo para redes de área personal, local y metropolitana, con el fin de es-

tudiar las características necesarias para implementar y estandarizar este tipo de redes.

En el proyecto, que ha sido base para la generación de este artículo, se realiza el estudio del funcionamiento y estandarización de las WMN fijas y se determina su capacidad para el transporte de Voz sobre IP (*Voice Over Internet Protocol*, VoIP) sobre un diseño específico realizado para una de las microrredes del proyecto EHAS-Silvia [1] que posteriormente se valida en la herramienta de simulación NCTUns 3.0 [2]. El funcionamiento, la configuración y los protocolos de enrutamiento de las WMN se detallan en [3] así como las consideraciones de VoIP en este entorno.

## **2. DISEÑO DE UNA WMN FIJA PARA EL TRANSPORTE DE VOZ Y DATOS APLICADO AL ENTORNO DEL PROYECTO EHAS-SILVIA**

A partir del estudio de los conceptos principales de las WMNs y la VoIP se procede a realizar el diseño específico de la WMN para una de las microrredes del proyecto EHAS-Silvia, no sin antes establecer una serie de criterios de diseño que permitan identificar cuál es la tecnología inalámbrica más adecuada para la implementación de esta red teniendo en cuenta las condiciones físicas, técnicas, económicas, políticas y demográficas que se presentan en un entorno rural.

En [3] se presentan los criterios establecidos y la evaluación de las tecnologías IEEE 802.15.4, 802.11x y 802.16 para cada uno de ellos. Del análisis se concluyó que la tecnología IEEE 802.11x proporciona una mejor

solución de interconexión inalámbrica para la red de EHAS-Silvia, razón por la cual se tomó como base para el posterior diseño y simulación de la red.

En cuanto al protocolo de enrutamiento a implementar en la red, se concluyó que el más adecuado para los nodos de la malla es STP, debido a que este es un protocolo para redes fijas y de nivel 2, el cual tiene la capacidad de restablecer las rutas en caso de caída de algún enlace y además, concuerda con las bases del nuevo estándar IEEE 802.11s [4]. Con respecto al *codec* más adecuado para el desarrollo de este proyecto se concluye que es más conveniente utilizar el *codec* G.729, pues de acuerdo con estudios realizados en [5] y [6], éste garantiza una buena calidad de servicio en la transmisión de voz y datos de redes inalámbricas.

### *A. Arquitectura de la solución*

Siguiendo el esquema de configuración de infraestructura o *backbone* en malla, que se detalla en la Figura 1, se definió una arquitectura de la solución compuesta por MAPs (*Mesh Access Points*) con *gateways* que son los encargados de conectar la WMN con otras redes LAN y WLAN, MAPs cuya función es enrutar la información a través de toda la red y clientes convencionales que se conectan a estos MAP por medio de enlaces *Ethernet* o tarjetas inalámbricas.

Para realizar cada uno de los pasos de la ingeniería del enlace entre los cuales se encuentra la definición de la topología del sistema, la ubicación de los puntos a interconectar, la determinación de Línea de Vista (*Line Of Sight*, LOS) y cálculos de Fresnel,



Figura 1. Configuración de infraestructura o *backbone*

análisis de RF y determinación del presupuesto del enlace se utilizó la herramienta software de libre distribución Radio Mobile [7] que permite simular las condiciones de un enlace inalámbrico mediante el manejo de sus parámetros más sobresalientes.

La herramienta escogida incluye la ayuda de cartografía digital que permite establecer el relieve y las condiciones del radio enlace más cercanos a la realidad, lo cual se presenta a través de una interfaz gráfica; su manejo implica descargar un mapa digital de la región o área en estudio, así como ingresar las posiciones de los puntos que se desean ubicar y algunas especificaciones típicas de los equipos (como potencia del transmisor ( $P_{TX}$ ), pérdidas de línea de transmisión y recepción ( $L_{TX}$ ,  $L_{RX}$ ), ganancia de las antenas de transmisión y recepción ( $G_{TX}$ ,  $G_{RX}$ ), sensibilidad del receptor ( $S_{RX}$ ) y altura de las antenas ( $A$ ) que se aspiran utilizar, para el diseño en particular se han asumido los valores

detallados en la Tabla 1. Después de configurar todos estos parámetros es posible revisar algunas condiciones que se presentan en cada uno de los enlaces como LOS, presencia de obstáculos, distancia entre los puntos, cálculo de interferencias, pérdidas de propagación, entre otras.

Tabla 1. Valores asumidos para los cálculos del presupuesto del enlace

Parámetro	Nodos de Soporte	Nodos Finales
$P_{TX}$ [dBm]	30 (1 W)	23 (200 mW)
$L_{TX}$ [dB]	1	1
$L_{RX}$ [dB]	1	1
$G_{TX}$ [dBi]	24	24
$G_{RX}$ [dBi]	24	24
SRx [dBm]	-95	-95
A [mts]	20	10

A partir de una de las funcionalidades de esta herramienta que muestra la calidad de señal entre dos puntos, fue posible observar que no todos los puntos presentaban LOS y ésta es

una condición obligatoria para un enlace inalámbrico Wi-Fi, razón por la cual fue necesario ubicar puntos intermedios para lograr la conexión.

Debido a la imposibilidad de realizar una visita a cada uno de los puntos para corroborar sus condiciones y ubicar nuevos puntos intermedios (que en este proyecto se denominarán Nodos de Soporte), se decidió utilizar otra de las funcionalidades de la herramienta denominada “zonas de probabilidad de cobertura” que permite observar la zona de visibilidad para un punto en particular o la zona de cobertura radio eléctrica para la frecuencia y sistemas estudiados. Siguiendo este procedimiento, se dibujaron las zonas de visibilidad para aquellos puntos que no tenían LOS entre sí y las áreas comunes entre ellos se tomaron como referencia para la ubicación de los nodos de soporte. Otro criterio que se tuvo en cuenta para la ubicación de estos nodos, fue la distribución de tráfico en la red, que se presenta con mayor frecuencia desde cada uno de los puestos de salud hacia el hospital que lo administra, por esta razón, se ubicaron los nodos de soporte tratando de que cada puesto de salud tuviera al menos dos caminos diferentes para conectarse a su centro de salud, adicionalmente, algunos puestos de salud tienen conexión directa con otros puestos de salud lo cual crea un nuevo camino de comunicación que no existía en la red anterior y puede ser provechoso para crear nuevos servicios o en casos de emergencias para comunicarse con el puesto de salud más cercano.

La Figura 2 muestra los establecimientos, enlaces y nodos de soporte utilizados para interconectar los

puntos de la microrred de San Carlos. Esta red está compuesta por un nodo pasarela ubicado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca que contiene un MAP con *gateway* y todos los elementos necesarios para conseguir el acceso a Internet y suministrar los servicios a la red; varios nodos de soporte constituidos por MAPs e instalados sobre toda la zona de cobertura del proyecto y varios clientes convencionales denominados nodos cliente que estarán presentes en cada uno de los establecimientos de salud. En esta figura, las líneas de color verde representan un enlace inalámbrico con LOS entre los dos puntos con una señal de +3 dB, lo cual se considera como adecuado para el desempeño del sistema.

### 3. SIMULACIÓN A NIVEL DE SISTEMA DE LA WMN PARA LA MICRORRED DE SAN CARLOS

La selección del software para la simulación se realizó mediante la comparación de las principales herramientas existentes, enfocándose principalmente en aquellas que operan con Licencia Pública General (*General Public License*, GPL) y tienen la capacidad de simular WMNs.

De este modo se analizó el Simulador de Redes 2 (*Network Simulator*, NS2) [8] y el Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung 3.0 (*National Chiao Tung University Network Simulator*, NCTUns 3.0) [9] concluyendo que NCTUns 3.0 presenta mayores ventajas para la implementación de este proyecto, las cuales pueden resumirse en una interfaz gráfica más intuitiva con respecto a la que presenta el simu-

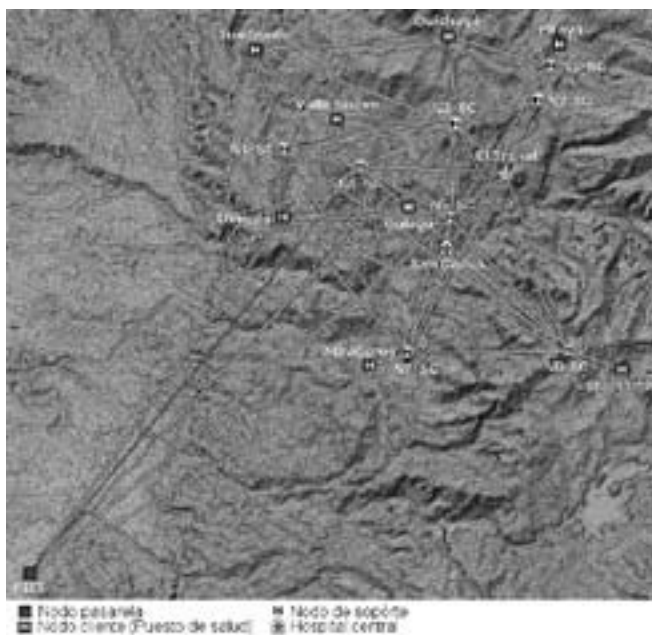


Figura 2. Diseño final de la WMN para la microrred de San Carlos

lador NS2, mayor facilidad para el desarrollo de los diseños de red, configuración y adaptación de los mismos, así como múltiples herramientas para el análisis de todas las fases de estudio de un sistema, incluyendo diseño, simulación y recolección de datos. Por otro lado, posee una amplia librería de dispositivos de red, lo cual proporciona una aproximación más real y práctica de la teoría, lo que no sucede con el simulador NS2.

Una de las características más importantes del NCTUns 3.0 es que permite simular obstáculos que bloquean la línea de vista entre dos puntos, de esta manera se pueden diseñar y estudiar de una forma más real redes para entornos rurales como la requerida en este proyecto. Además, el simulador NCTUns 3.0 presenta algunas características que se recomendaron en la evaluación de los criterios para

la selección de la tecnología, entre las cuales se encuentran: la velocidad de datos soportada por el estándar 802.11b, la implementación de al menos 2 interfaces en los equipos de la malla, la posibilidad de evaluar diferentes *codecs* para el transporte de VoIP y la implementación de protocolos de enrutamiento de nivel 2 que concuerdan con las bases del nuevo estándar 802.11s.

#### A. Implementación de la WMN sobre el simulador NCTUns 3.0

A partir del diseño tratado en la sección II se procedió a implementar la red sobre el módulo WMN del simulador NCTUns, se ubicaron todos los nodos pertenecientes a la microrred de San Carlos, de los cuales 15 son de soporte y se representan en el simulador por puntos de acceso a la malla que implementan el protocolo de enru-

tamiento STP, 9 nodos cliente que se representan por equipos móviles configurados en modo infraestructura y 1 nodo pasarela representado por una multigateway con soporte para malla la cual se conecta por medio de enlaces cableados de 10 Mbps a 1 enrutador y 1 equipo fijo que suministran los servicios de red. Todos estos elementos se extienden en un área de 2000 x 2000 m. Para facilitar el proceso de ubicación de los puntos de manera que conserven con mayor fidelidad las distancias relativas de cada establecimiento de salud y las condiciones de línea de vista entre los puntos, se hizo uso de una funcionalidad del simulador que permite cargar imágenes de fondo en el área de trabajo, de esta manera fue posible utilizar la imagen generada por la herramienta Radio Mobile (Figura 2), con la ubicación de todos los nodos y sus correspondientes líneas de vista. Sobre este fondo se ubicaron cada uno de los nodos y las obstrucciones presentes, representadas por las líneas de color naranja. La

implementación final puede observarse en la Figura 3.

Todas las pruebas de la red se realizaron sobre el mismo diseño implementado, la simulación se ejecutó durante 100 segundos, de los cuales los primeros 10 segundos se utilizan por el simulador para configurar la red. La generación de llamadas de VoIP para cada uno de los equipos cliente se realizó utilizando una aplicación propia del simulador denominada *rtpsendrecv*, la cual permite enviar y recibir paquetes con el Protocolo de Transporte en Tiempo Real (*Real Time Transport Protocol*, RTP). Esta aplicación también permite configurar los detalles de la llamada, tales como el tipo de *codec* a utilizar para los distintos tipos de datos (audio o video), la(s) dirección IP del nodo cliente al cual se desea llamar, puertos, tiempos de inicio y finalización de llamada, a través de un archivo basado en el Protocolo de Descripción de Sesión (*Session Description Protocol*, SDP) que se carga en cada uno de los nodos cliente.



Figura 3. Implementación de la WMN para la microrred de San Carlos sobre el simulador NCTUns



Cada nodo de soporte tiene dos interfaces inalámbricas IEEE 802.11b con una capacidad de 11 Mbps, la primera opera en modo infraestructura para atender los nodos clientes, mientras la segunda opera en modo Ad Hoc para transmitir inalámbricamente los paquetes entre los demás nodos de soporte.

### B. Simulaciones y resultados

Para verificar el funcionamiento correcto de la WMN implementada para la microrred de San Carlos e identificar la capacidad máxima de la red en cuanto al número de comunicaciones de VoIP soportadas, se establecieron 3 escenarios que comprueban el desempeño de la red ante factores como la cantidad de saltos, simultaneidad de llamadas y reestablecimiento de rutas. En cada uno de estos escenarios se evaluó la capacidad máxima del sistema a partir de la medición de parámetros como el *throughput*, retardo, *jitter* y pérdida de paquetes para cada llamada.

En cada escenario se generaron llamadas de VoIP que utilizaron el protocolo RTP y el codec G.729. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

#### 1. Escenario 1: Máxima cantidad de saltos soportados

Para evaluar la máxima cantidad de saltos soportados por la microrred de San Carlos se tomó como referencia uno de los nodos de la red sobre el cual se establecieron llamadas a otros nodos ubicados a diferentes saltos. Para el caso particular de esta microrred se identificó que la máxima cantidad de saltos para comunicar dos nodos distantes era de

7 saltos, razón por la cual se tomó este valor como umbral de medida y se procedió a tomar los datos del *throughput*, retardo, *jitter* y pérdida de paquetes, presentes en cada llamada. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4, 5, 6 y 7 respectivamente.

En la Figura 4 se muestra la medida *throughput* enviado y recibido para cada una de las llamadas, cabe notar que el simulador NCTUns toma este valor como el número de Kilobytes por segundo (KBps) enviados y recibidos por un nodo determinado a nivel MAC, teniendo en cuenta que el valor del *throughput* enviado puede calcularse de la siguiente manera: si se utiliza el *codec* G.729 para la compresión de audio se está generando una carga útil de 20 Bytes, adicionalmente los protocolos RTP, UDP e IP generan 40 Bytes de encabezados, mientras que a nivel MAC se introducen 40 Bytes para el tratamiento de la malla, para un total de 100 Bytes por paquete, por otro lado, el *codec* G.729 genera 50 paquetes por segundo por lo cual se espera que el *throughput* enviado sea de 5 KBps. Por su parte, el *throughput* recibido puede tener valores menores debido a la pérdida de paquetes durante la transmisión por el aumento del tráfico en la red.

A partir del anterior análisis, puede observarse que existe una pequeña variación del *throughput* recibido con respecto al enviado que se incrementa a medida que aumenta el número de saltos debido a la necesidad de más tramas de control y gestión para controlar la llamada, lo cual incide directamente sobre el *throughput* de cada conversación.

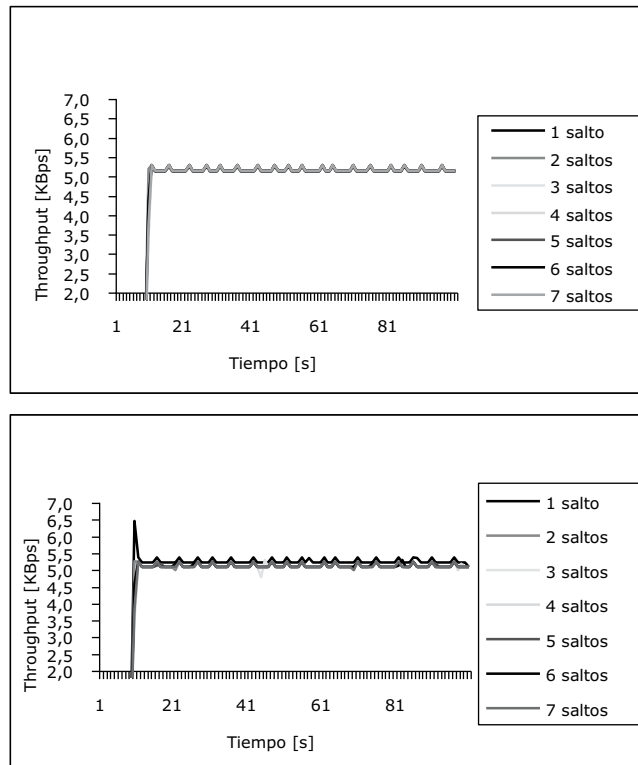


Figura 4. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas con múltiples saltos

En las Figuras 5, 6 y 7 se observa que los parámetros de calidad de la voz (retardo, *jitter* y pérdida de paquetes) aumentan de acuerdo con la cantidad de saltos presentes en la transmisión. Sin embargo, estos valores no exceden los límites permitidos para una comunicación adecuada, por lo cual se concluye que el número de saltos presentes en la red no imposibilitan el correcto establecimiento de las llamadas.

## 2. Escenario 2:

### Máxima cantidad de llamadas simultáneas

La evaluación de este escenario permite identificar la incidencia del

tráfico sobre la calidad de la voz. Para conseguir resultados que se aproximen en mayor medida a la operación real de la red se debe tener en cuenta el tipo de distribución de tráfico actual que presenta la microrred de San Carlos y el tipo de distribución adicional que permite la WMN. El sistema de comunicación de esta zona se caracteriza por la emisión de llamadas desde cada uno de los puestos de salud hacia el hospital que los administra, sin embargo, con el diseño de la WMN también es posible establecer una comunicación directa entre los puestos de salud sin tener que dirigirse primero hacia el hospital principal. Por lo tanto, en

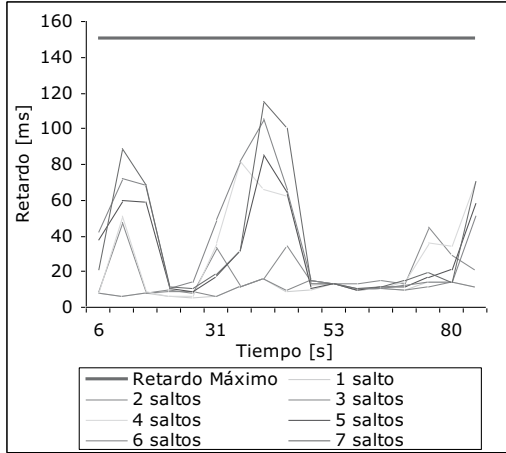


Figura 5. Medida del retardo para llamadas con múltiples saltos

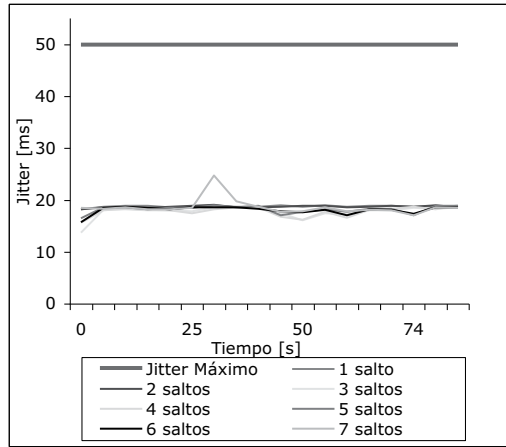


Figura 6. Medida del jitter para llamadas con múltiples saltos

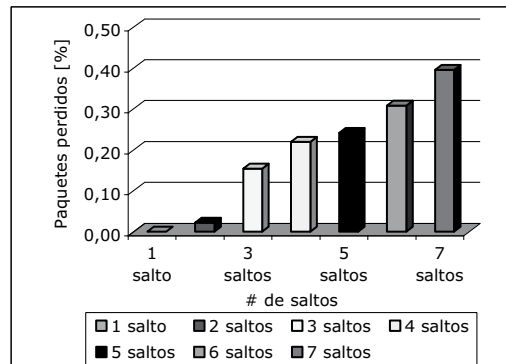


Figura 7. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas con múltiples saltos

este escenario se evaluaron los dos tipos de distribución de tráfico.

• **Llamadas simultáneas al hospital de San Carlos**

En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos cuando se realizan llamadas simultáneas desde los puestos de salud hacia el hospital de San Carlos. Cabe notar que cada uno de estos puestos de salud debe pasar por diferentes saltos para comunicarse con el hospital principal.

En la Figura 8 se demuestra que el *throughput* recibido es mucho menor que el enviado. Esto se debe a que al aumentar el número de llamadas en la red, existe una mayor compe-

tencia por el acceso al medio que provoca mayor congestión y pérdida de paquetes. Se observa por ejemplo, que la medida del *throughput* para 6 llamadas cae considerablemente y algunas veces llega a cero por lo cual puede esperarse que los resultados de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes no sean adecuados para la generación de 6 llamadas consecutivas.

En las Figuras 9, 10 y 11 puede observarse que los valores de retardo, *jitter* y pérdida de paquetes no superan los límites para una óptima comunicación de voz hasta las 5 llamadas simultáneas, después de este punto estos factores aumentan considerablemente. Este resultado implicaría que 5 de los 8 puestos de salud pueden comunicarse al tiempo

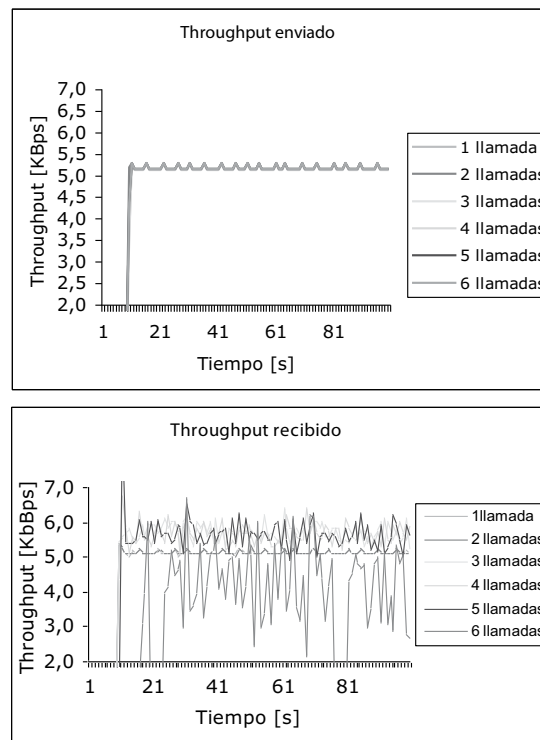


Figura 8. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

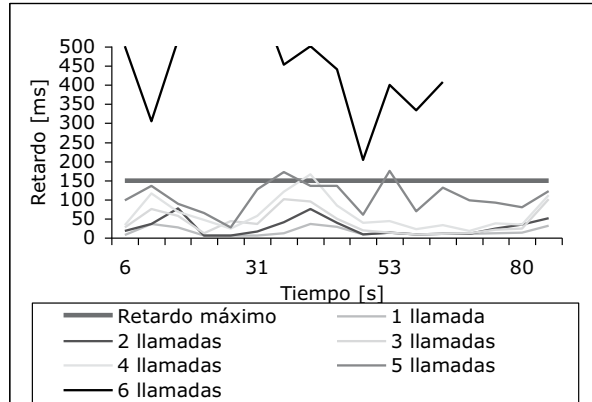


Figura 9. Medida del retardo para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

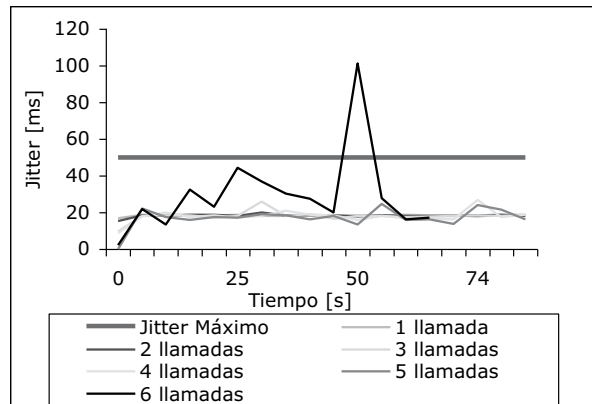


Figura 10. Medida del jitter para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

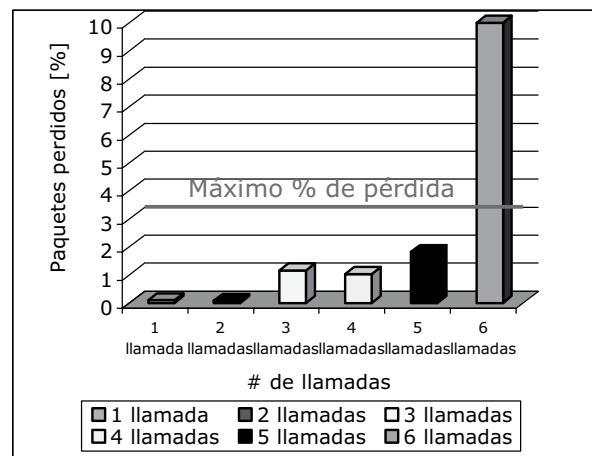


Figura 11. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas al hospital de San Carlos

con el hospital de San Carlos, lo cual favorece la comunicación de la mayoría de puestos de salud con el hospital central, aunque es importante aclarar que en la realidad, la probabilidad de que las llamadas se realicen al mismo tiempo es baja.

• ***Llamadas simultáneas entre los puestos de salud***

Además de evaluar el caso de comunicación más común en la red actual, es interesante observar el comportamiento de la red ante la realización de llamadas simultáneas entre los diferentes puestos de salud, pues este podría ser un servicio adicional que mejoraría el sistema de comunicación de la zona.

Para realizar esta prueba se efectuaron llamadas entre puestos de salud lejanos que deben atravesar múltiples saltos para establecer la comunicación. Los puestos de salud interconectados fueron: Tumburao-Miraflores, Pitayó-Santa Lucía, Quichayá-San Carlos, Valle Nuevo-Pitayó y Santa Lucía-San Carlos.

Al igual que en el anterior escenario, el aumento de llamadas en la red incide directamente sobre su desempeño, la pérdida de paquetes es muy alta (Figura 12) cuando se realizan 5 llamadas simultáneas pues el número de nodos de soporte utilizados para retransmitir los paquetes es mayor debido a que hay más saltos y por lo tanto el número de paquetes perdidos es muy alto como para soportar otra llamada.

Los resultados obtenidos permiten establecer que existe un menor desempeño de la red cuando las llamadas simultáneas se realizan a diferentes

puntos en lugar de a un solo punto, esto se debe a que en este caso los nodos de la red no sólo manejan el tráfico generado por ellos mismos para la comunicación con otro punto sino que también actúan como enrutadores de otros nodos y por lo tanto deben manejar un tráfico de reenvío que generalmente consume gran cantidad de los recursos de la red antes de alcanzar su destino final.

Por otro lado, con el fin de evaluar la capacidad de la red en las peores condiciones los nodos que se tomaron para esta prueba fueron los más distantes entre sí, lo cual también reduce la cantidad de llamadas soportadas. Para corroborar el anterior análisis se realizó una prueba más en la cual se tomaron nodos más cercanos con menor cantidad de saltos, y como puede observarse en la Figura 13 el desempeño de la red vuelve a mejorar obteniendo un máximo de 7 llamadas soportadas.

**3. Escenario 3:  
Restablecimiento de rutas**

Una de las principales ventajas que tiene la topología de malla es el restablecimiento automático de una ruta ante la caída de un nodo, este factor puede ser muy provechoso en un entorno rural donde las operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo se dificultan debido a que generalmente los puntos de acceso se encuentran en lugares muy lejanos y dispersos, y el personal que se encarga de esta labor requiere desplazamientos al sitio, lo que se traduce en demoras del orden de varias horas, pasando a días e incluso semanas.

Las pruebas de este escenario permiten determinar el máximo número de

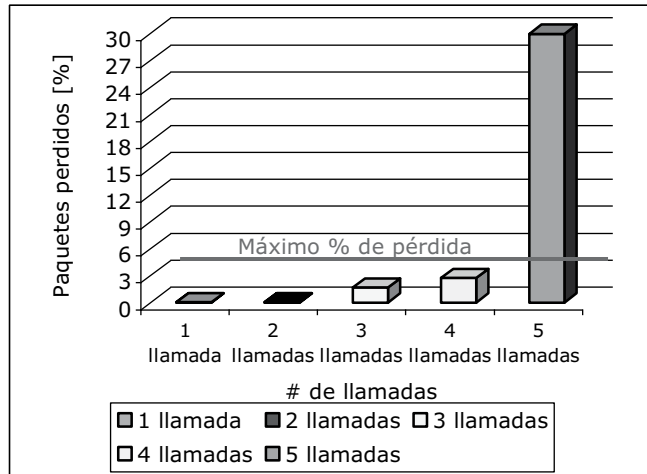


Figura 12. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud.

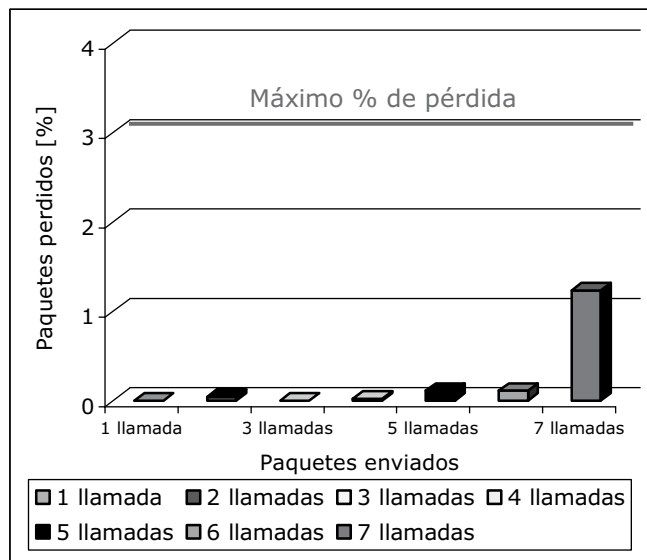


Figura 13. Medida del porcentaje de pérdida de paquetes para llamadas simultáneas entre los puestos de salud más cercanos

conexiones que pueden restablecerse ante la caída de un nodo y el tiempo de restablecimiento de un enlace caído. Al igual que en el escenario anterior, se evaluaron los dos tipos de distribución de tráfico: con llamadas

simultáneas al hospital de San Carlos y llamadas simultáneas entre los puestos de salud (más lejanos).

Para realizar las pruebas se generaron llamadas entre puntos distantes que se comunican entre sí a través

de varios nodos de enrutamiento, después de unos segundos de emisión uno de los nodos de soporte se cae y en ese momento el protocolo de enrutamiento debe actualizar sus rutas para reenviar el tráfico por una ruta alterna. En el instante de la caída de un nodo la comunicación se pierde, por lo tanto, el simulador no puede

medir los valores de retardo y *jitter* hasta que el protocolo establezca una nueva ruta, este comportamiento se observa en la Figura 14, donde cada llamada empieza con valores aceptables de retardo y *jitter*, luego no muestra valores por la caída del nodo y finalmente vuelve a restablecerse.

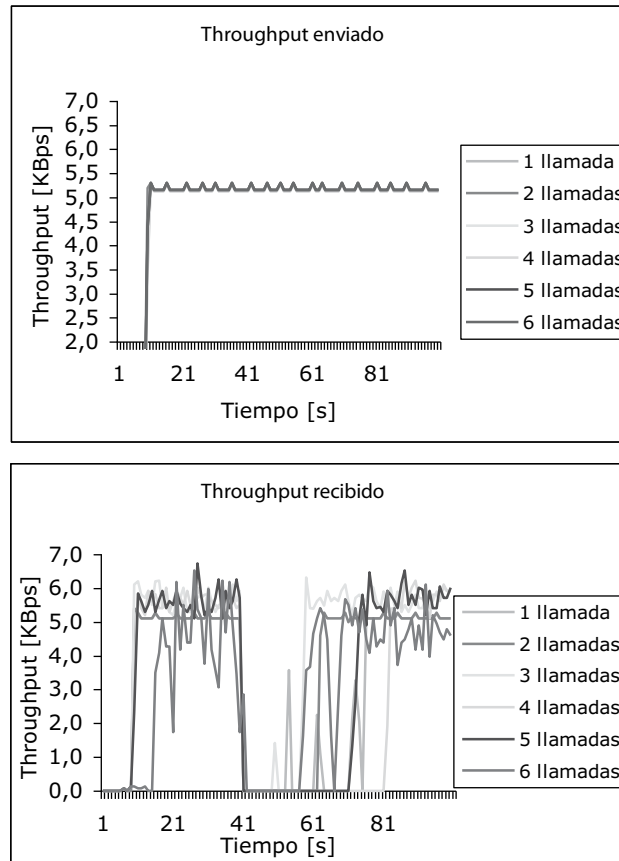


Figura 14. Medida del *throughput* enviado y recibido para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

• **Llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos**

De los resultados obtenidos para la prueba de llamadas simultáneas al hospital de San Carlos puede concluirse que el restablecimiento de una

ruta presenta gran incidencia sobre los factores que afectan la calidad de la voz. El comportamiento reflejado en la Figura 15 demuestra que el restablecimiento de la ruta dura aproximadamente 20 segundos, sin



embargo, después de este proceso los parámetros analizados necesitan de un tiempo extra de aproximadamente 10 segundos para encontrarse de nuevo dentro de los límites permitidos. Esto hace concluir que, en este caso, el servicio de comunicación definitivamente se pierde, pero el puesto de salud no queda incomunicado por mucho tiempo, pues después de unos segundos se habilita automáticamente una ruta de respaldo. Caso contrario a lo que sucede con la tecnología actual implementada que ante este problema necesita desplazar a la zona personal capacitado para reparar la falla, lo cual puede tardar varios días y mientras tanto el servicio de comunicación se suspende totalmente.

• **Llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud**

Esta última prueba permite determinar la capacidad máxima de la red en las peores condiciones (nodos más lejanos); en la Figura 16 se observa que al igual que en el anterior escenario el tiempo de restablecimiento del nodo es crítico para el mantenimiento de

la llamada, por lo cual es necesario realizar un nuevo intento de llamada después de unos segundos. Es interesante observar que para este caso el tiempo de restablecimiento es mayor a medida que aumenta el número de llamadas y particularmente se encontró que la capacidad de la red disminuye en una llamada con respecto a la prueba anterior por las mismas razones expuestas en el escenario de llamadas simultáneas entre los puestos de salud.

Con la implementación, simulación y evaluación de los tres escenarios planteados se comprueba, en primer lugar, que la WMN presenta un funcionamiento adecuado para la generación de llamadas en ambientes con múltiples obstrucciones como las de un entorno rural. Además, se observa que la capacidad máxima de la red varía de acuerdo con los diferentes eventos que ocurren en la red, pero en ninguno de estos escenarios la red se ve afectada totalmente y en el peor de los casos por lo menos 4 de los 8 puestos de salud pueden mantener una comunicación al mismo tiempo.

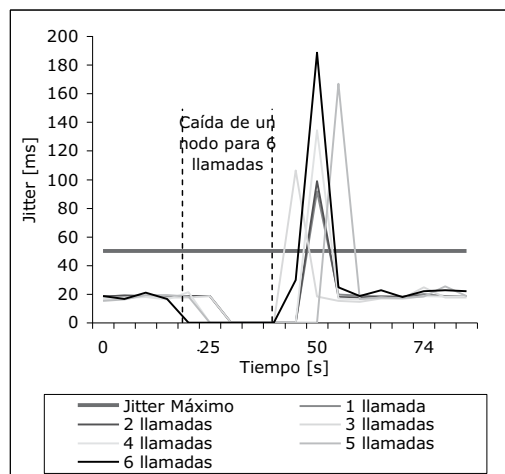


Figura 15. Medida del jitter para llamadas simultáneas con caída de nodos al hospital de San Carlos

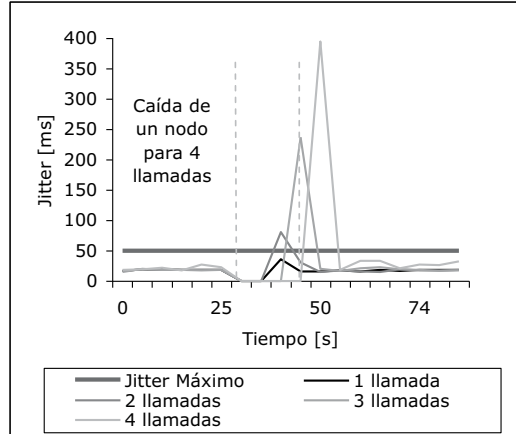


Figura 16. Medida del jitter para llamadas simultáneas con caída de nodos entre los puestos de salud

#### 4. CONCLUSIONES

Las WMNs constituyen una de las mejores soluciones para la comunicación de sitios distantes, puesto que sus características de robustez, escalabilidad, flexibilidad, auto configuración y auto regeneración aportan múltiples beneficios en la implementación de sistemas de comunicación de entornos apartados que generalmente imponen restricciones de costo, alcance, disponibilidad, redundancia y flexibilidad en sus implementaciones.

La mejor opción para la implementación de una WMN para el transporte de VoIP en un entorno rural de Colombia, es la tecnología IEEE 802.11x, puesto que presenta mayores ventajas en cuanto a costos, simplicidad, flexibilidad, presencia en el mercado, calidad de servicio, seguridad y desarrollo.

Gracias a la flexibilidad y capacidad de la herramienta de simulación seleccionada se pudo configurar parámetros característicos de las WMNs como el número de interfaces,

el tipo de protocolo de enrutamiento, la implementación de aplicaciones para la generación de llamadas con diferentes codecs, entre otros, por lo que fue posible aproximarse en gran medida al comportamiento real de una WMN.

Los resultados obtenidos en cuanto al número de saltos que soporta una comunicación permiten concluir que la WMN implementada es factible para la comunicación de todos los puestos de salud de la zona, ya que en ningún caso el número de nodos por los cuales pasa la llamada introduce retardos que imposibiliten el correcto desarrollo de la llamada.

La evaluación de la simultaneidad de llamadas a uno o diferentes puntos permite observar que a pesar de que en este caso la red debe realizar mayor procesamiento debido a la introducción de múltiples saltos en los caminos y al aumento en la competencia por el medio generada por la solicitud de comunicación de los diferentes nodos, el desempeño de la red sigue siendo adecuado y permite

que un buen porcentaje de los establecimientos puedan comunicarse a la vez.

El comportamiento de la red ante la caída de un nodo cuando se realizan varias llamadas simultáneas evidencia que la falla de un nodo representa la desconexión de la comunicación de VoIP, pues, aunque existe un protocolo de enrutamiento que busca una ruta alterna para retransmitir los datos, el tiempo de restablecimiento del camino es de aproximadamente 30 segundos que no son aptos para mantener una llamada. No obstante, este resultado mejora los niveles de disponibilidad de la red con respecto al sistema actual, pues en este último la falla del nodo representa la suspensión total de la comunicación hasta que el personal técnico solucione el problema, lo cual puede tardar ya no del orden de segundos sino de varios días.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Rendón, A. Martínez, M. F. Dulcey, J. Seoane, R. G. Shoemaker, V. Villarroel, D. López, J. Simó. "Rural Telemedicine Infrastructure and Services in the Department of Cauca, Colombia". *Telemedicine and e-Health*. Aug 2005, Vol. 11, No. 4: 451-459.
- [2] S. Wang, Y. Lin. "NCTUns network simulation and emulation for wireless resource management" *RRM for next-generation wireless and mobile communication systems 2005*, vol. 5, no 8 (23 ref.), pp. 899-916.
- [3] J. Hurtado, D. Lozano, G. Agredo. "Diseño y Simulación de una Red Inalámbrica en Malla para el

Transporte de Voz en un Entorno Rural". Proyecto de Grado. FIET. Universidad del Cauca, 2007.

- [4] S. Faccin, C. Wijting, J., A. Damle. "Mesh WLAN networks: concept and system design" *Wireless Communications, IEEE Volume 13, Issue 2, April 2006* Page(s):10 - 17.
- [5] "Informe esencial sobre telefonía por el protocolo Internet". Grupo de Expertos sobre Telefonía IP del UIT-D. Disponible en: <[http://www.itu.int/ITU-D/e-strategy/publications-articles/pdf/IP-tel\\_report-es.pdf](http://www.itu.int/ITU-D/e-strategy/publications-articles/pdf/IP-tel_report-es.pdf)>
- [6] G. Agredo, J. Gaviria. "Evaluación Experimental de la Capacidad de IEEE 802.11b para soporte de VoIP". *Tecnologías convergentes aplicadas a la computación móvil. Memorias I2ComM 2006*. Págs 28 – 39.
- [7] Radio Mobile, Freeware by VE2-DBE V7.6.9. Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- [8] Network Simulator 2. Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [9] NCTUns 3.0 Network Simulator and Emulator. Disponible en: <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>

## CURRÍCULOS

**Diana Carolina Lozano.** Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Formadora del programa Computadores para Educar – Universidad del Cauca. Áreas de interés: Desarrollo de aplicaciones Web y aplicaciones móviles celulares,

gestión y seguridad de redes y comunicaciones inalámbricas.

**Julián Andrés Hurtado.** Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Ingeniero de Redes Móviles en la empresa Huawei Technologies. Áreas de interés: Administración, gestión y seguridad de redes, comunicaciones móviles, redes de nueva generación, Voz sobre IP.

**Guefry Agredo Méndez.** Docente de la facultad de Ingeniería Electrónica

y de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Candidato a Magíster. Estudiante de la Maestría en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad del Cauca. Investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT). Áreas de interés: comunicaciones inalámbricas, voz sobre IP, Servicios de Internet. ☼