

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



Las TIC en comunidades rurales aisladas: aplicación de esquemas de compresión de encabezados y su impacto en la reducción de la brecha digital

TESIS

que para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA presenta:

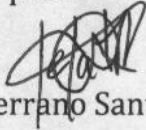
ÁLVARO ARMENTA RAMADE

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ARTURO SERRANO SANTOYO

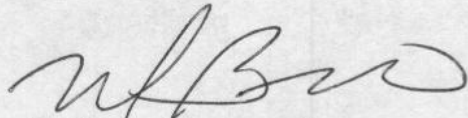
RESUMEN de la Tesis de Álvaro Armenta Ramade, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN INGENIERÍA EN ELECTRONICA. Mexicali, Baja California, México. Diciembre de 2013

LAS TIC EN COMUNIDADES RURALES AISLADAS: APLICACIÓN DE ESQUEMAS DE COMPRESIÓN DE ENCABEZADOS Y SU IMPACTO EN LA REDUCCIÓN DE LA BRECHA DIGITAL

Resumen aprobado por:



Dr. Arturo Serrano Santoyo



Dr. Miguel Enrique Bravo

La gran mayoría de los proyectos que buscan reducir la brecha digital en las comunidades rurales aisladas se enfocan en instalar infraestructura de TICS en establecimientos públicos conocidos como Centros Comunitarios Digitales (CCD). Estudios de campo mostraron que una cantidad importante de estos CCD no son operativos debido a la falta de interés o conocimiento de los pobladores por hacer uso de esa infraestructura. Estas observaciones implicaron abordar la problemática utilizando un enfoque interdisciplinario que permitiera tomar en cuenta las dinámicas socioeconómicas de las comunidades. Como resultado de esto, se planteó un escenario en el cual el acceso al Internet se extiende a los hogares por medio de redes inalámbricas 802.11 para poder ofrecer el servicio de telefonía a través de Voz sobre IP (VoIP). Debido al tamaño reducido de las muestras de voz producidas por los códecs y al sobreencabezamiento de los protocolos de comunicación, se propone un esquema para reducir el tamaño de los encabezados a través de la compresión estática (solamente se comprimen los campos estáticos) de encabezados de los protocolos RTP/UDP/IP y la utilización de un direccionamiento virtual de 8 bits en la capa MAC. El mecanismo propuesto se simuló en el programa Opnet y se obtuvo una eficiencia de compresión ligeramente mayor a la obtenida por los mecanismos de compresión cRTP y RoHC sin la necesidad de mantener sincronizados los contextos. Los resultados de las simulaciones mostraron que aplicando el mecanismo propuesto se incrementa la capacidad de la red para transportar llamadas telefónicas simultáneas manteniendo los parámetros de calidad de servicio (QoS) por debajo de lo recomendado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Así mismo se concluyó que para mantener niveles de calidad aceptable en las llamadas telefónicas en las comunidades rurales, se debe utilizar una topología en estrella con un máximo de 2 saltos.

Palabras clave: VoIP, compresión de encabezados, 802.11, brecha digital

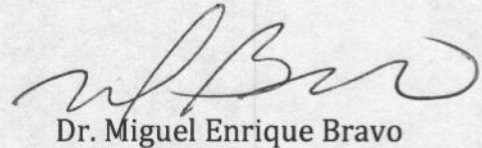
ABSTRACT of the thesis, presented by Alvaro Armenta Ramade, in order to obtain the DOCTOR of ENGINEERING DEGREE in ELECTRONICS ENGINEERING. Mexicali, Baja California, Mexico. December, 2013

ICT applications in isolated rural communities: applications of packet header compression schemes and their role in reducing the digital divide.

Approved by:



Dr. Arturo Serrano Santoyo



Dr. Miguel Enrique Bravo

The vast majority of projects that aim to reduce the digital divide in isolated rural communities focus on ICT infrastructure installed in public facilities known as Digital Community Centers (DCC). Field studies showed that a significant number of these DCC's are not fully operational due to lack of interest or knowledge by community members to make use of this infrastructure. Our observations led to address the problem using an interdisciplinary approach that would take into account the socio-economic dynamics of these communities. As a result, we propose a scenario in which the Internet access of DCCs is extended to households via an 802.11 wireless network to offer local telephone service through Voice over IP (VoIP). Due to the small size of the voice samples produced by the codecs and the overhead of the communication protocols, we propose a multilayer header compression scheme for reducing the header size by using RTP/UDP/IP static header compression and use an 8-bit virtual addressing in the MAC layer. The proposed mechanism was simulated in Opnet and obtained a slightly higher compression efficiency than those obtained by RoHC and cRTP. Simulation results showed that by applying the proposed mechanism, the network increased its ability to carry more telephone calls while maintaining quality of service parameters below the values recommended by the International Telecommunication Union. It also was concluded that to maintain acceptable levels of voice quality in rural communities, the wireless network must be a star topology with a maximum of 2 wireless hops.

Keywords: VoIP, header compression, 802.11, digital divide

Dedicatoria

A mi esposa Liliana y a mi hija Vanessa

Este trabajo está dedicado a ustedes, con todo mi amor, porque sin su apoyo y comprensión no hubiera sido posible terminar este proyecto.

A mis padres, Filiberto y Evelia,

Por darme la vida y estar ahí cuando los he necesitado...

Agradecimientos

Al Dr. Arturo Serrano Santoyo por su amistad y todo el apoyo recibido durante el desarrollo de la presente tesis. Gracias por permitirme participar en los proyectos y aprender un poco de su vasta experiencia.

Al Dr. Roberto Conte Galván por su amistad y todos los consejos para sacar adelante este proyecto.

A la Dra. Anamaría Escofet por dedicarme su tiempo en los talleres semanales sobre sistemas complejos.

A los miembros del comité de tesis, el Dr. Miguel E. Bravo Zanoguera, Dr. Gabriel A. López Morteo y Dr José A. García Macías por su apoyo y consejos para realizar esta tesis.

A mis compañeros de la Dirección de Estudios de Posgrado, del Departamento de Comunicación y Dirección de Impulso a la Innovación y Desarrollo por su amistad y ánimo para terminar la tesis.

Al Dr. David Covarrubias Rosales y al CICESE, por su apoyo para permitirme continuar con mis estudios de posgrado

A la UABC por aceptarme como estudiante de doctorado y por el apoyo recibido.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema	4
1.2	Objetivo	7
1.3	Alcance	7
1.4	Método	8
1.5	Equipos y herramientas utilizados	9
1.6	Organización del documento	9
2	Marco metodológico	10
3	Marco contextual	15
4	Marco conceptual	25
4.1	Introducción	25
4.2	Ejemplos de proyectos para reducir la brecha digital en comunidades rurales	25
4.3	Transmisión de VoIP como alternativa de comunicación en poblaciones rurales	28
4.4	Impacto de los encabezados en el tamaño de las tramas de VoIP	30
4.5	Trabajos relacionados a la compresión de encabezados	36
5	Desarrollo tecnológico propuesto	46
5.1	Introducción	46
5.2	Esquema de compresión propuesto	49
5.3	Simulación	60
6	Resultados	72
6.1	Tasa de pérdida de paquetes de voz	73
6.2	Retardo extremo a extremo	76
6.3	Variación del retardo (variancia)	80
6.4	Jitter	81
6.5	Retardo en la capa MAC	84
6.6	Tráfico de la capa MAC	86
6.7	Discusión de los resultados	88
7	Conclusiones	93
7.1	Trabajo futuro	98
8	Bibliografía	100
	APENDICE A. CASO OAXACA	105

Índice de figuras

Figura 1. Interacciones entre el sistema tecnológico con el sistema socioeconómico y comunitario	7
Figura 2. Conectividad de red instalada	16
Figura 3. Componentes analíticos del sistema.....	22
Figura 4. Esquema de conectividad propuesto.....	24
Figura 5. Elementos que integran una aplicación VoIP	29
Figura 6. Arquitectura OSI	30
Figura 7. Paquete de voz más el encabezado RTP	31
Figura 8. Paquete de voz, mas el encabezado de RTP y UDP	32
Figura 9. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP e IPv4.....	33
Figura 10. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP e IPv6.....	34
Figura 11. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP, IPv6 y MAC.....	35
Figura 12. Diagrama de estados del compresor ROHC	39
Figura 13. Diagrama de estados de descompresor ROHC.....	41
Figura 14. Esquema cooperativo de compresión de encabezados y agregación de paquetes. Modificado de [23].	43
Figura 15. Encabezado MAC 802.11. Tomado de [24]......	44
Figura 16. Campos estáticos de los encabezados RTP, UDP e IPv6	47
Figura 17. Paquete comprimido.....	50
Figura 18. Paquete de solicitud de contexto (v6)	50
Figura 19. Paquete de confirmación de contexto	50
Figura 20. Algoritmo de compresión de los encabezados RTP/UDP/IP	51
Figura 21. Representación de un contexto IPv6	52
Figura 22. Flujo de comunicación para establecer el contexto.....	53
Figura 23. Proceso de descompresión de encabezados RTP/UDP/IP.....	54
Figura 24. Encabezado MAC 802.11. a) Con direcciones de 48 bits y b) con direcciones virtuales de 8 bits	55
Figura 25. Trama de Solicitud de Asociación y Dirección Virtual	57
Figura 26. Trama de Respuesta de Asociación y Dirección Virtual	57
Figura 27. Esquema de conversión de direcciones de 48 bits a 8 bits	59
Figura 28. Esquema de conversión de direcciones de 8 bits a 48 bits	60
Figura 29. Modelo WLAN de un dispositivo con acceso a la red.....	61

Figura 30. Proceso en donde se realiza la compresión del encabezado RTP/UDP/IP..	61
Figura 31. Proceso en donde se realiza el direccionamiento virtual	63
Figura 32. Diagrama de estados del proceso <i>wireless_lan_mac</i>	63
Figura 33. Topología lineal.....	65
Figura 34. Arquitectura de la red simulada	68
Figura 35. Escenario 1: Un salto.....	69
Figura 36. Escenario 2: Dos saltos.....	70
Figura 37. Escenario 3: Red de tres saltos.....	70
Figura 38. Escenario 4.....	71
Figura 39. Pérdida de paquetes de VoIP. a) Un salto; b) Dos saltos; c) Tres saltos y d) Cuatro saltos	75
Figura 40. Comportamiento del retardo extremo a extremo comparando el mecanismo de compresión con respecto al modelo sin compresión; a) Un salto; b) dos saltos; c) tres saltos y d) cuatro saltos	78
Figura 41. Variación del retardo extremo a extremo. Comparación del mecanismo de compresión con respecto al modelo sin compresión; a) escenario con un salto; b) escenario con dos saltos; c) escenario con tres saltos y d) escenario con cuatro saltos	81
Figura 42. Variación en los tiempos de interarribo de paquetes de VoIP.....	82
Figura 43. Comportamiento del jitter	83
Figura 44. Retraso observado en la capa MAC.....	86
Figura 45. Tráfico de la capa mac	87
Figura 46. Retardo y PLR correspondiente al escenario uno	88
Figura 47. Retardo y PLR correspondiente al escenario dos.....	89
Figura 48. Retardo y PLR correspondiente al escenario tres.....	90
Figura 49. Retardo y PLR correspondiente al escenario cuatro.....	91
Figura 50. Capacidad de llamadas en relación al número de saltos	94
Figura 51. Topología estrella de dos saltos.....	95

Índice de tablas

Tabla 1. Densidad telefónica por cada 100 habitantes de estados con alto y bajo índice de desarrollo	2
Tabla 2. Número de bytes de señalización agregados por protocolo	5
Tabla 3. Cuadro de actores	23
Tabla 4. Características principales de los códec	29
Tabla 5. Eficiencia de compresión de los esquemas de compresión.....	48
Tabla 6. Paquetes de control del mecanismo de compresión RTP/UDP/IP	49
Tabla 7. Campos estáticos de un paquete RTP/UDP/IPv6	51
Tabla 8. Tramas de gestión para el mecanismo de compresión de la capa MAC	56
Tabla 9. Configuración de los enrutadores 1, 2 y 3.....	66
Tabla 10. Configuración del enrutador 4	66
Tabla 11. Configuración de las terminales inalámbricas de la WLAN	67
Tabla 12. Configuración de las terminales Ethernet	67
Tabla 13. Configuración de la fuente de tráfico de voz	68

1 Introducción

El desarrollo de infraestructura de telecomunicaciones ha sido escaso en zonas del país con un desarrollo menor al promedio nacional. Mientras que en los estados desarrollados se habla de servicios de banda ancha, ya sea por medio de líneas telefónicas o inalámbricos de tercera y cuarta generación, estados como Guerrero, Oaxaca y Chiapas, caracterizados por amplias comunidades rurales y aisladas, cuentan con un importante rezago en la prestación de servicios básicos de telecomunicaciones (ver Tabla 1).

De acuerdo a la Tabla 1, estos estados tuvieron un crecimiento marginal en el número de líneas fijas en el periodo 2002-2011 y más del 85% de la población no cuenta con líneas fijas. No obstante lo anterior, la telefonía móvil presentó un crecimiento importante al llegar a penetración de un poco más del 50%. Sin embargo, estos datos contrastan con los del Distrito Federal, en el cual cerca de la mitad de la

población cuenta con una línea telefónica fija y existen más líneas móviles que habitantes.

Tabla 1. Densidad telefónica por cada 100 habitantes de estados con alto y bajo índice de desarrollo.

	2002		2011	
	Fija	Móvil	Fija	Móvil
Estados desarrollados				
Distrito Federal	37.6	40.4	47.44	106
Jalisco	18.95	32.9	23.58	93.2
Nuevo León	23.96	47.9	30.54	101.2
Estados con poco desarrollo				
Chiapas	4.25	5.3	5.16	53.1
Guerrero	8.23	13.5	11.07	53.7
Oaxaca	5.20	7.7	7.22	50.1

Fuente: INEGI

El significativo avance de las comunicaciones móviles en las comunidades rurales se debe principalmente a que las compañías de telefonía fija están limitando la creación de nueva infraestructura por lo costoso que resulta desplegar cable en comunidades en donde la geografía es muy accidentada (requiere la instalación de muchos postes y kilómetros de cable), y la baja densidad poblacional limita el retorno de la inversión. En estas condiciones las compañías de telefonía celular tienen su ventaja competitiva, ya que con una sola antena pueden atender a una gran cantidad de usuarios. Sin embargo, aunque más comunidades rurales cuentan con cobertura celular, todavía faltan muchas comunidades por cubrir, en especial las que se encuentran muy alejadas de los centros poblacionales.

Por otro lado, la convergencia de servicios de telecomunicaciones sobre la plataforma del Protocolo de Internet (IP por sus siglas en inglés) y el despliegue masivo de las redes inalámbricas basadas en la especificación IEEE 802.11 (WLAN), ofrecen una alternativa viable para llevar los servicios de telecomunicaciones básicos (telefonía e Internet de banda ancha), a las comunidades rurales y remotas del país. Tres condiciones que llevan a tomar en cuenta esta alternativa son:

1. El uso de aplicaciones de voz sobre IP (VoIP por sus siglas en inglés) por parte de algunas empresas (como por ejemplo, Skype y Axtel) para ofrecer telefonía de larga distancia a través de redes privadas y el Internet.
2. El bajo costo de los equipos WLAN y que prácticamente ya vienen incluidos en todos los equipos de cómputo móvil.
3. La operación de los equipos WLAN en el espectro de uso libre lo que permite desplegar redes sin necesidad de requerir permisos y concesiones por parte de los entes reguladores gubernamentales.

Sin embargo, los equipos WLAN fueron diseñado para la transmisión de datos que no son sensibles a los retardos (por ejemplo, buscar información o consultar páginas de Internet), por lo que para ser considerados como una alternativa a los enlaces de última milla en una red de telefonía local, es necesario estudiar su arquitectura de acceso al medio inalámbrico y realizar mejoras a los protocolos de comunicación.

La motivación para el desarrollo de esta tesis viene de la participación de un proyecto binacional entre México y los Estados Unidos para dotar y ofrecer el servicio de videoconferencia entre dos comunidades de ambos países que estuvieran conectadas por la migración. Durante este proceso, se dotó de infraestructura de banda ancha al pequeño municipio de San Miguel Tlacotepec en la mixteca oaxaqueña para que los que habían emigrado a los Estados Unidos se pudieran comunicar por medio de videoconferencia con sus familiares en San Miguel. Sin embargo, la comunidad no hizo mucho uso de la nueva infraestructura y prefirió seguir utilizando las casetas de telefonía pública como medio de comunicación, ya que la mayoría de los hogares no cuentan con teléfono fijo [1].

Uno de los aprendizajes de este proyecto es que el proceso de adopción tiene que hacerse de una manera más transparente al usuario cuando éste se enfrenta a dispositivos que requieren de una capacitación especializada. De este aprendizaje nace la idea de proveer dentro de sus hogares dispositivos de comunicación más familiares como el teléfono, lo cual sería el primer paso para iniciar el proceso de inclusión digital.

Otro de los aprendizajes en esta investigación es que el enfoque disciplinario no es suficiente para dar cuenta en su totalidad del proceso multifactorial de reducción de brecha digital en las comunidades rurales. Es decir, un enfoque centrado en la tecnología y su despliegue no es condición necesaria y suficiente para garantizar que la tecnología instalada contribuya a mejorar las condiciones socioeconómicas y culturales de la población.

En este trabajo de tesis doctoral, se toman en cuenta los aspectos tecnológicos, de adopción y participación comunitaria así como las interacciones entre estos sistemas para, por un lado, hacer un planteamiento de acuerdo al contexto, y por otro, coadyuvar en la búsqueda de alternativas que puedan proveer mejores opciones de comunicación a la población.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Desde la perspectiva tecnológica

La transmisión de paquetes de voz dentro de una red WLAN requiere de mantener parámetros de calidad como la tasa de error, el retardo y el jitter dentro de los límites recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés). En comunidades rurales, en donde la infraestructura de telecomunicaciones es escasa, el uso de redes WLAN para conectar a la mayoría de los hogares requiere de interconectar enrutadores de forma inalámbrica, lo cual impone restricciones en el número de llamadas que se pueden mantener simultáneamente dentro de los límites recomendados.

Los códec de voz utilizados en aplicaciones de VoIP, por lo general, producen paquetes de 10 a 160 paquetes, los cuales son transportados por medio de protocolos que permiten la entrega expedita de paquetes sin garantizar la entrega de los mismos. Los protocolos de las redes IP que más comúnmente se utilizan con las aplicaciones de VoIP son:

- a) Protocolo de tiempo real (RTP por sus siglas en inglés),
- b) Protocolo de datagramas de usuario (UDP por sus siglas en inglés)

c) Protocolo de Internet (IP, por sus siglas en inglés).

Conjuntamente, debemos considerar el protocolo de la capa MAC de la especificación IEEE 802.11 que se esté utilizando para acceder al canal inalámbrico. Cada uno los protocolos agrega una serie de bytes de señalización (encabezados) para la correcta transmisión/recepción de los datos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Número de bytes de señalización agregados por protocolo

Protocolo	Bytes
RTP	12
UDP	8
IPv6	40
MAC 802.11	28 o 34
Total	88 o 94

A cada paquete generado por el códec, se le agregarán 60 bytes de encabezados (12 bytes de RTP, 8 bytes de UDP y 40 bytes de IPv6). Así mismo, debemos considerar al menos 28 bytes más correspondientes a la capa MAC y 14 bytes más del paquete de confirmación (ACK) que se requiere enviar para confirmar la recepción de una trama de datos. En resumen, para transmitir 20 bytes de voz codificada, se tendrán que enviar 122 bytes en total.

Con lo anteriormente expuesto se observa que la transmisión de señales de voz a través de una red 802.11 es poco eficiente, ya que cerca del 85% del contenido de la trama es información de señalización. Esta ineficiencia puede afectar la capacidad de las redes inalámbricas para transmitir simultáneamente varias conversaciones telefónicas.

Para aumentar la eficiencia en la transmisión de muestras de voz, se han desarrollado esquemas de compresión de encabezados que aprovechan la redundancia en los encabezados de los paquetes de los diferentes protocolos. La compresión funciona transmitiendo, solo al inicio de la sesión, los bytes de los encabezados que se mantienen constantes durante la duración de una sesión. Otro tipo de información que se encuentra en los encabezados va cambiando de forma

predeterminada entre paquetes consecutivos, como por ejemplo, el contador de paquetes que se incrementa en 1 a medida que se van generando los paquetes. En estos casos, en lugar de transmitir el número de paquete, solo se transmite el intervalo por el cual está cambiando, en este ejemplo, 1. Sin embargo, para que esto funcione correctamente, estos esquemas requieren mantener una sincronización entre los nodos transmisor y receptor, para poder reconstruir el encabezado completo en el nodo receptor. Esta sincronización obliga a introducir tráfico de señalización dentro de la red, lo cual puede disminuir los ahorros obtenidos al aplicar la compresión.

1.1.2 Desde la perspectiva socioeconómica y comunitaria

Desde que se identificó el concepto de brecha digital a mediados de la década de los noventa, en México se han destinado una gran cantidad de recursos económicos y programas de gobierno para tratar de reducir esta brecha, la cual afecta principalmente a las comunidades rurales. Sin embargo, al día de hoy, es posible aseverar que la brecha digital no se ha reducido en una proporción directa a la cantidad de esfuerzos económicos y humanos realizados.

La mayoría de los esfuerzos se han concentrado en poner al alcance de la población el uso de computadoras con Internet en lugares públicos, esperando que ésta haga uso de la nueva infraestructura para satisfacer sus necesidad de comunicación, así como incentivar el desarrollo económico de las comunidades. Esta estrategia dejó como resultado que un porcentaje alto de las instalaciones que se adecuaron para este propósito se encuentren abandonadas, y en algunos casos, los equipos de cómputo sigan empaquetados, como se pudo corroborar en el trabajo de investigación que se llevó a cabo en el estado de Oaxaca [2].

Aunque la forma de abordar el problema de la brecha digital se ha ido modificando para integrar otros aspectos diferentes al tecnológico, se sigue abordando en un esquema vertical y de arriba hacia abajo sin considerar las dinámicas propias de las comunidades afectadas. Este hecho invita a la reflexión sobre la manera en que se estudia la problemática de la brecha digital, y la forma en que la infraestructura de TIC es instrumentada como respuesta a la problemática estudiada.

Se propone entonces un enfoque que tome en cuenta la interacción entre los sistemas que conforman el objeto de estudio, el cual se contextualiza en el entorno de las poblaciones rurales (ver Figura 1).

1.2 Objetivo

El objetivo de la presente tesis es proponer un esquema de compresión que no requiera mantener la sincronización de estados entre el transmisor y el receptor, y al mismo tiempo, se obtenga la misma ganancia de compresión que los esquemas actuales de compresión, de tal manera, que permita hacer viable la utilización de servicios de VoIP en las poblaciones rurales y lograr la aceptación de las comunidades de la tecnología instalada para su beneficio a fin de impactar en la reducción de la brecha digital.

1.3 Alcance

El presente trabajo abarca el desarrollo de un prototipo de mecanismo de compresión de encabezados y su implementación en un simulador de redes para su evaluación y validación. Por restricciones de tiempo y económicas, no se pretende la implantación en hardware del prototipo desarrollado.

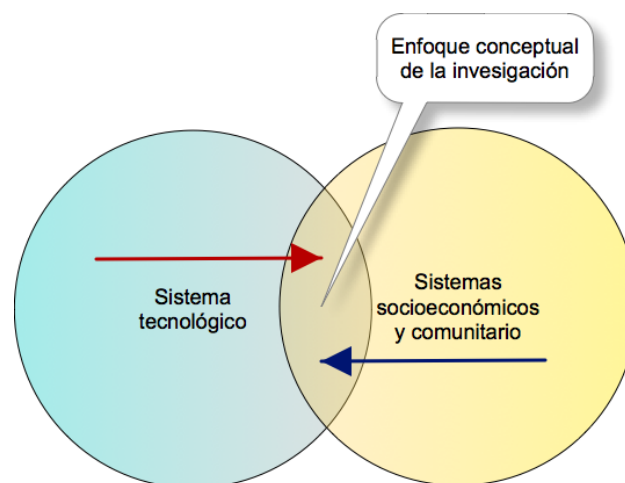


Figura 1. Interacciones entre el sistema tecnológico con el sistema socioeconómico y comunitario

1.4 Método

En esta sección se describe brevemente el método seguido para el desarrollo de la presente investigación.

1.4.1 Análisis crítico de los enfoques utilizados en la dotación de servicios de acceso a Internet en las poblaciones rurales.

Se realizó un trabajo de campo en el estado de Oaxaca, en donde se visitaron las instalaciones de diversos centros comunitarios digitales (CCD) instalados como parte del programa e-México en las comunidades rurales de ese estado. Se realizaron observaciones en relación al uso que las comunidades hacían de los CCD, y de si estos han impactado el desarrollo socioeconómico de dichas comunidades.

1.4.2 Investigación del estado del arte

En esta parte se hizo una investigación de la bibliografía reciente sobre los trabajos que se llevan a cabo en el área de compresión de encabezados. En este punto se detectaron posibles áreas de oportunidad y se definió la estrategia a seguir.

1.4.3 Diseño de un mecanismo de compresión de encabezados

En este punto, utilizando como referencia los trabajos relacionados, se propuso un esquema de compresión que pudiera ofrecer el mismo nivel de ganancia que los esquemas de compresión utilizados actualmente.

1.4.4 Implementación y simulación

Las herramientas de simulación nos permiten validar los modelos propuestos de una manera rápida y económica, pues no se requiere el ensamble físico de los prototipos. Aunque no se puede hablar de que las simulaciones se comporten de la misma manera que un dispositivo real, si nos pueden dar una aproximación del comportamiento real de nuestro diseño. La implementación y simulación se realizó en el programa de simulación Opnet versión 14.5.

1.5 Equipos y herramientas utilizados

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los siguientes elementos:

- I. Computadora portátil Apple MacBook Pro con procesador de doble núcleo y 4 GB de memoria RAM.
- II. Computadora de escritorio con procesador Intel de 3.1 GHz y 2 GB en memoria RAM.
- III. Simulador de redes Opnet Versión 14.5 (versión para educación).
- IV. Programa de análisis estadístico Origin Pro 8.1.
- V. Microsoft Excel 2011.
- VI. Microsoft Word 2011.

1.6 Organización del documento

La organización del documento es la siguiente: en el capítulo dos se muestra el marco metodológico que sirvió de base para abordar el problema tecnológico; en los capítulos tres y cuatro se presentan los marcos contextuales y conceptuales en que sirvieron de base para ubicar la problemática estudiada y establecer los conceptos necesarios para abordar la problemática. En el capítulo cinco se presenta el mecanismo de compresión de encabezados desarrollado, y en el capítulo seis se presentan los resultados obtenidos. En el capítulo siete se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro. Finalmente, se presenta un apéndice en donde se describe el trabajo de campo desarrollado en Oaxaca.

2 Marco metodológico

En este trabajo de tesis se ha adoptado una aproximación integral que considera el proceso de reducción de la Brecha Digital en las comunidades rurales como un sistema, cuyo comportamiento multifactorial lo constituye como un fenómeno complejo y dinámico, en el cual se identifica al subsistema tecnológico y al subsistema social como sus principales elementos. Ambos subsistemas interactúan entre sí para conformar, por un lado sus funciones y comportamiento, y por otro, darle la forma y estructura dinámica de un sistema adaptivo y abierto [3]. Bajo esta óptica, el presente trabajo de investigación plantea un marco teórico que aborda la reducción de la Brecha Digital con un enfoque alternativo para su análisis y comprensión, el cual pueda eventualmente coadyuvar al diseño de estrategias que contribuyan a hacer más eficientes los proyectos denominados de *inclusión digital* de las instituciones públicas y privadas en los contextos rurales.

El núcleo fundamental del trabajo de tesis parte del análisis de un escenario observado en el proyecto de dotar a una población rural del estado de Oaxaca con infraestructura de banda ancha para acceso a Internet. De este análisis se deriva un escenario deseado que incorpora los elementos tecnológicos necesarios para lograr que la infraestructura a instalar pueda ser adoptada por la comunidad, tomando en cuenta sus necesidades y forma de interactuar con la tecnología [4]. El contraste entre el escenario observado y el deseado conducen a conformar las preguntas de investigación que permiten definir la solución tecnológica propuesta. Es decir, el subsistema tecnológico se conforma en función de las interacciones de los proveedores de la infraestructura de acceso a Internet, en este caso las instituciones académicas participantes y la población rural beneficiaria. La propuesta tecnológica desarrollada en la investigación requirió entonces de atención disciplinaria de ingeniería de redes inalámbricas y sistemas de telecomunicaciones, sustentada por el conocimiento de factores asociados a la dinámica poblacional de la comunidad rural sujeto de estudio. Sin embargo, como fue observado en el transcurso del proyecto, un enfoque disciplinar de carácter tecnológico, aunque necesario, no da cuenta de la naturaleza multidimensional del proceso de reducción de la Brecha Digital.

El anterior planteamiento condujo a adoptar un corte interdisciplinario que atiende al objeto de estudio como un sistema socio-técnico, en donde existe un acoplamiento entre las necesidades de la población, y los atributos y capacidades de las TIC, en particular de las tecnologías inalámbricas de banda ancha [5].

La conformación del marco metodológico se lleva a cabo en función de la propuesta de Rolando García [6] sobre investigación interdisciplinaria. Esta propuesta de análisis sistémico es a su vez una metodología para la investigación interdisciplinaria, la cual proporciona fundamentos teóricos y empíricos que permiten entender con mayor profundidad la dinámica del sistema bajo estudio. La metodología de Rolando García aplicada a sistemas ambientales constituye un modelo interdisciplinario que en su construcción, de acuerdo al contexto y a su evolución y dinámica, es capaz de responder a las preguntas conductoras que dan origen a la investigación planteada. Una vez que se establece la pregunta conductora, se inicia el

proceso mediante el cual se definen los elementos del sistema socio-técnico, en este caso el proceso de reducción de la Brecha Digital en las comunidades rurales. De esta forma, al proveer una solución tecnológica más apegada a la necesidad poblacional, la Ingeniería se hace más pertinente a su entorno y se nutre de las interacciones de los usuarios.

Para entender el comportamiento del sistema socio-técnico en la perspectiva sistémica propuesta, es necesario entender los procesos históricos en la evolución de los proyectos para reducir la Brecha Digital. Con esto se puede comprender de mejor manera los componentes y factores clave del sistema, y tal como indica Rolando García, no se trata de aprender más sobre la Brecha Digital y su reducción, mas bien se trata de “pensar de otra manera”, lo cual obliga a reformular o conceptualizar en una perspectiva sistémica la reducción de la Brecha Digital.

Conceptualización de la Brecha Digital

El concepto de Brecha Digital toma especial importancia a partir de la última década del siglo XX con la incursión de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en todas las actividades del quehacer humano. Esta incursión de las TIC en el tejido social no ha sido equitativa para todo tipo de contexto, haciendo evidente la diferencia entre quienes tienen la posibilidad de acceso a la llamada *Sociedad del Conocimiento* y quienes no la tienen. Al revisar los alcances de las políticas públicas para reducir la Brecha Digital en el contexto rural *vis a vis* el contexto urbano, diversas agencias reconocen que la Brecha Digital y su reducción constituyen un fenómeno interdisciplinario que involucra aspectos tecnológicos, socioeconómicos, culturales y regulatorios. Esta enumeración de factores permite vislumbrar que la condición de la Brecha Digital en el contexto rural se pueda analizar e interpretar como un sistema socio-técnico.

La Brecha Digital según Castells, aparece como resultado de la implantación de las TIC en distintos entornos sociales. Algunos autores la definen como, “la disparidad entre los que tienen y los que no tienen acceso a Internet o no saben cómo tener acceso o aplicarlo” [7]. Por su parte la OECD define la Brecha Digital como: “Desfase o división entre individuos, hogares, áreas económicas y geográficas con

diferentes niveles socioeconómicos con relación tanto a sus oportunidades de acceso a las tecnologías de la información y la comunicación, como al uso de Internet para una amplia variedad de actividades” [8]. La Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL) la define, en un estudio sobre la transición de la economía industrial a la economía digital, como “la diferencia entre aquellos que tienen acceso a las tecnologías digitales y aquellos que no” [9]. Por otro lado, la Asociación Latinoamericana de Integración (ALADI), la define como “aquella que cuantifica la diferencia existente entre países, sectores y personas que tienen acceso a los instrumentos y herramientas de la información y la capacidad de utilizarlos y aquellos que no lo tienen” [10].

En la actualidad, diversos autores consideran que un factor significativo para que los países y grupos sociales evolucionen a mejores niveles de desarrollo es el acceso a la información y al conocimiento [11]. Las TIC, aparte de proveer oportunidades de desarrollo, cuando no son aplicadas utilizando estrategias de participación comunitaria ni se consideran factores socioeconómicos y culturales, tienden a proveer resultados marginales en el aprovechamiento del potencial de dichas tecnologías, y en algunos casos, generan desigualdades sociales entre los que tienen y no tienen acceso a la información [12].

Lo anterior nos permite, para propósitos de la presente investigación, conceptualizar la brecha digital como la separación que existe entre aquellas personas o grupos que tienen acceso a las TIC y aquellas que no lo tienen y aunque en ocasiones se cuente con el acceso, las tecnologías y sus aplicaciones potenciales no se utilizan en forma integral debido a factores educativos, económicos, generacionales, culturales y de otra naturaleza.

Dada la importancia que en la actualidad reviste el tema de la Brecha Digital, instituciones gubernamentales, proveedores de sistemas y equipos, así como organizaciones no gubernamentales, se han dado a la tarea de desarrollar proyectos en entornos urbanos y rurales enfocados a reducir tal brecha. Se observa que en estos contextos, las políticas públicas empleadas por gobiernos federales y municipales para la reducción de la Brecha Digital no se incorporan en forma integral los aspectos

de construcción de capacidad, adopción tecnológica, usabilidad y sustentabilidad, mediante los cuales se pudiera conformar un marco de referencia que tome en cuenta la multidimensionalidad e interacción entre todos los factores involucrados [13].

3 Marco contextual

La principal motivación para la realización de la presente tesis, fue la observación de la problemática asociada a la reducción de la brecha digital en comunidades rurales en México. Durante el periodo del 2005 al 2008, se realizó el proyecto “Bridging the Digital Divide and Reducing Poverty in Rural Mexico: New Approaches and Improved Human Capacity to Address Telecom/Microfinance Linkages” en el cual uno de los objetivos fue estudiar el impacto de la aplicación de la videoconferencia en una comunidad rural dividida por el fenómeno de la migración [14]. Para esto, se llevaron a cabo diversos estudios de campo para encontrar una comunidad que cumpliera con las siguientes características: a) alto índice de migración a los Estados Unidos; b) que la mayoría de sus migrantes se concentraran en alguna ciudad del sur de California, en los Estados Unidos; y c), una limitada o nula infraestructura de telecomunicaciones. Como resultado de este análisis se escogió la comunidad de San Miguel Tlacotepec (SMT), localizada la región de la mixteca oaxaqueña (al norte del estado de Oaxaca), la cual está integrada en su mayoría por

adultos mayores y jóvenes menores de 18 años. La mayoría de los jóvenes adultos emigran al estado de California en los Estados Unidos. La mayoría de los migrantes se concentran en la ciudad de Vista (localizada al norte de San Diego) en donde han formado un comité de migrantes de SMT.

Tradicionalmente, el correo, el telégrafo y más recientemente la telefonía pública, han sido los principales medios de comunicación por los cuales las familias se han mantenido en contacto. Muchos de los que han emigrado, no han regresado a SMT por más de 10 años, lo que significa que el único contacto que han tenido en ese lapso de tiempo es a través cartas o teléfono. Tomando en cuenta este punto, se consideró que una estructura de videoconferencia sería bien aceptada por los miembros de la comunidad como medio de interacción (que permitiera un contacto visual) entre los pobladores residentes en los Estados Unidos y en SMT. La infraestructura instalada consistió de un enlace inalámbrico de 14 km para obtener acceso a Internet de banda ancha proveniente de la comunidad vecina de Santiago de Juchitahuaca, la cual cuenta con un nodo de acceso a Internet provisto por la empresa Telmex. Parte de la infraestructura incluye el equipo de cómputo y los accesorios para realizar la videoconferencia.

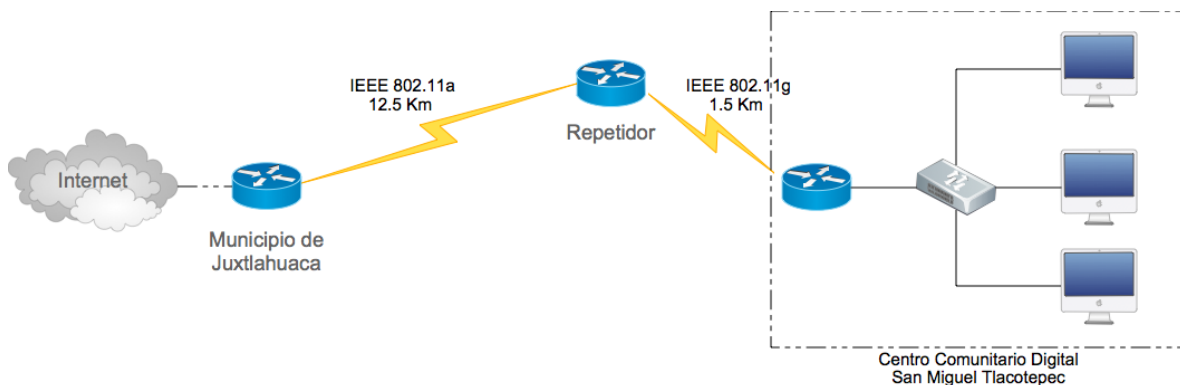


Figura 2. Conectividad de red instalada en Oaxaca

Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron varias llamadas por videoconferencia entre pobladores de SMT y familiares que residen en los Estados Unidos en la ciudad de Vista, condado de San Diego en California. Sin embargo, se observó que a pesar de la capacidad tecnológica instalada, no se logró la adopción de

la videoconferencia como una alternativa con alta penetración entre los pobladores de SMT. Es decir, la conectividad provista no produjo el nivel de atención esperado por los usuarios, particularmente, los de edad avanzada. La experiencia observada en el uso de la infraestructura instalada dio evidencias de que los usuarios exhibían desafíos en su interacción con la tecnología mostrando inseguridad y timidez al enfrentar el proceso de videoconferencia mediante una computadora. Algunos de los usuarios manifestaron opiniones respecto al hecho de que el escuchar la voz de sus familiares pudiera ser suficiente para satisfacer su necesidad de comunicación con sus familiares. En el apéndice A se incluye una descripción más amplia sobre la experiencia en Oaxaca.

Esta experiencia cultural y antropológica rebasó los alcances establecidos al origen de esta investigación y dio cuenta de la necesidad de llevar a cabo estudios de adopción tecnológica, usabilidad y participación comunitaria requeridos para lograr apropiación de la tecnología de parte de los pobladores de SMT. Sin embargo, nuestras observaciones permitieron ajustar nuestro enfoque tecnológico para incorporar elementos y parámetros y análisis que mejor se ajusten al entorno de SMT. Es decir, nuestra investigación giró hacia llevar a cabo una simulación con una infraestructura en donde se privilegia los servicios de voz a los cuales la población responde satisfactoria y asertivamente.

El resultado obtenido fortaleció la idea de que el factor humano es fundamental para que las comunidades puedan asimilar la tecnología y la puedan utilizar como un coadyuvante del desarrollo socioeconómico. La instalación de infraestructura por sí sola no da cuenta de todos los aspectos para reducir la brecha digital en forma efectiva.

Con el objeto de sustentar la metodología empleada en este trabajo de investigación, se presenta a continuación un análisis histórico sobre el desarrollo de los diferentes enfoques utilizados para abordar la problemática de la brecha digital.

Históricamente es posible identificar cuatro etapas en las cuales se han utilizado enfoques diferentes para atacar la problemática de la reducción de la brecha digital en el entorno rural [13]:

- I. **Primera etapa.**- Las estrategias para reducir la brecha digital estaban basadas en una definición de la brecha digital centrada en los aspectos tecnológicos como acceso a Internet y computadoras. Se pensaba que la brecha digital estaba dada por la diferencia entre los que tenían acceso a equipos de cómputo e Internet y los que no. La idea fue que instalando más infraestructura, la brecha digital disminuiría, es decir, se consideraba que existía una correlación negativa entre la brecha digital y la creación de infraestructura.
- II. **Segunda etapa.**- Se identificó que la brecha digital tiene una naturaleza interdisciplinaria, es decir, la tecnología por si sola no resuelve la problemática, así que se incorporaron aspectos socioeconómicos y aspectos regulatorios en las estrategias.
- III. **Tercera etapa.**- Se considera que la participación de la comunidad es un elemento fundamental para el éxito de los proyectos. El enfoque de los proyectos cambia a una naturaleza de desarrollo humano en donde la participación y liderazgo de las comunidades beneficiadas dan certidumbre al éxito de los proyectos
- IV. **Cuarta etapa.**- Finalmente, surge una incipiente cuarta etapa en donde se integran aspectos de desarrollo sustentable, valores humanos y asimilación de las experiencias exitosas de otros proyectos.

No obstante los avances en la identificación de factores involucrados en la brecha digital, es posible encontrar una gran cantidad de proyectos que aun utilizan estrategias de la primera o segunda etapa. En muchos de estos casos, los enfoques con que se plantean los proyectos no permiten que éstos tengan un impacto determinante en el desarrollo de las comunidades. Sin el involucramiento y participación de la comunidad, se corre el riesgo de que la infraestructura quede abandonada o subutilizada, debido entre otras cosas, a la falta de interés por utilizarlos (por no encontrar una utilidad práctica), a los costos de mantenimiento y del servicio.

Al abordar el problema de la brecha digital, es posible identificar factores multidisciplinarios como los tecnológicos, regulatorios, educativos, culturales, económicos entre otros. En función de esto, en [15] se propone un marco de

referencia centrado en el usuario en lugar de la tecnología. Este marco de referencia requiere de un enfoque multidisciplinario que integre aspectos sociales, computacionales, de diseño industrial y mercadotecnia que faciliten a los usuarios la adopción y apropiación de la tecnología.

Sin embargo, las experiencias obtenidas durante las cuatro etapas descritas anteriormente, sugieren que la brecha digital es un problema interdisciplinario más que multidisciplinario. La aplicación de estrategias para producir cambios en aspectos regulatorios, tecnológicos, educativos, culturales, sociales, etc, no tienen una respuesta lineal en la disminución de la brecha, es decir, no por el hecho de incrementar la infraestructura de TIC o introducir mejoras en el sistema regulatorio, se reducirá la brecha digital. Cada uno de estos aspectos se encuentra interrelacionado con los demás, por lo que un cambio en uno de ellos, puede tener un impacto positivo o negativo en los demás. Esto podría explicar los limitados avances en la reducción de la brecha digital que se han logrado a la fecha, principalmente en las comunidades rurales [16].

No se pone en duda el papel fundamental que las telecomunicaciones juegan en la reducción de la brecha digital. Sin embargo, para potencializar su impacto, es necesario conceptualizarlas mas allá de solo una disciplina asociada a un proceso tecnológico. Es decir, existen aspectos no tecnológicos, como los regulatorios, educativos, económicos, sociales y culturales que impactan la manera en que las telecomunicaciones son adoptadas por las comunidades: los resultados obtenidos en el proyecto en Oaxaca, requirió de una reflexión sobre el enfoque utilizado para abordar la brecha digital en comunidades rurales con mínima o nula infraestructura de banda ancha. Se consideraron los aspectos tecnológicos, económicos y sociales de manera disciplinaria, sin embargo, los resultados no fueron los esperados. Por este motivo, se sugiere abordar el problema de la brecha digital desde un enfoque interdisciplinario, como el utilizado por Castañares en [4]. Aunque la problemática estudiada por Castañares fue la gestión ambiental, el enfoque utilizado se puede extrapolar al tema de la brecha digital si consideramos los siguientes puntos:

- i. La brecha digital es un problema en el que intervienen aspectos tecnológicos, sociales, económicos y culturales que requieren de un enfoque multidisciplinario.
- ii. Es posible identificar procesos que ocurren en dimensiones espaciales y temporales distintos que requieren de un análisis diferenciado. Es decir, podemos encontrar procesos que se llevan a cabo localmente, como la adopción tecnológica y la dinámica cultural de una comunidad, y otros procesos que se llevan a cabo fuera de las comunidades y a niveles más generales como las políticas públicas, los programas sociales, etc. Estos procesos pertenecen a dinámicas y actores diferentes. Estas diferenciaciones permiten establecer niveles de análisis dentro del modelo analítico sobre la problemática de la brecha digital.
- iii. Se pueden observar flujos de intercambio de información entre los diferentes niveles de análisis definidos.

La abstracción del escenario actual en un modelo analítico requiere definir los niveles de análisis identificados a partir de los procesos involucrados en la problemática de la brecha digital en la comunidad bajo estudio (ver Figura 3). En el proyecto en cuestión se identificaron tres niveles, los cuales se describen a continuación:

- i. **Primer nivel:** En este primer nivel se catalogan los procesos que se involucran directamente en las dinámicas de la brecha digital y se agrupan en subsistemas de acuerdo a sus finalidades. Es un nivel operativo, ya que en este nivel se desarrollan las acciones que tienen un impacto director en la problemática de la brecha digital. De las observaciones de las condiciones actuales en el área de estudio, se pudieron identificar al menos tres subsistemas:
 - Un Subsistema tecnológico, donde convergen todos los aspectos relacionados con la infraestructura de telecomunicaciones, la provisión de servicios de telecomunicaciones y las habilidades digitales de la comunidad;

- Un subsistema económico-productivo, donde se identifican las principales actividades económicas y productivas de la comunidad y la manera en que estas impactan la calidad de vida de sus habitantes; y
- Un subsistema socio-cultural, donde se puede identificar elementos que determinan el comportamiento social de los habitantes.

Cada subsistema es, en principio, ortogonal a los demás subsistemas y por lo tanto, en muchas ocasiones se abordan disciplinariamente subestimando las interacciones que se llevan a cabo entre ellos. Al estudiarlos disciplinariamente se corre el riesgo de ignorar las redefiniciones dinámicas que se llevan a cabo dentro del sistema.

- ii. Segundo nivel: Tienen escalas espaciales y temporales diferentes a las de la problemática estudiada, sin embargo, ejercen una influencia sobre los procesos de primer nivel y llegan a determinarlos. Aquí encontramos los programas públicos (por ejemplo, el programa e-México) y privados que tienen por objetivo reducir la brecha digital [17].
- iii. Tercer nivel: Al igual que los procesos de segundo nivel, tiene escalas espaciales y temporales diferentes al primer nivel pero también al segundo nivel. Sus procesos influyen directamente los procesos del segundo nivel e indirectamente a los del primer nivel. Los procesos identificados incluyen aspectos de regulación, políticas públicas y recomendaciones internacionales, entre otras.

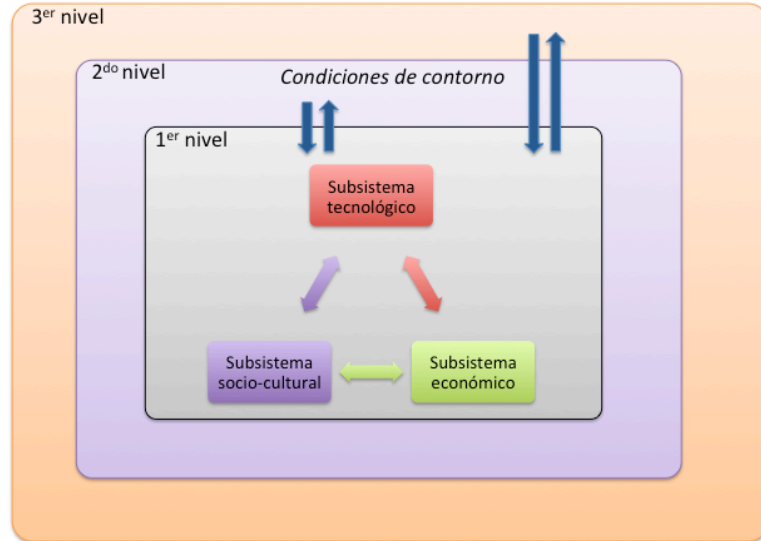


Figura 3. Componentes analíticos del sistema

De acuerdo a esta diferenciación, podemos distinguir tres tipos de decisiones correspondientes a cada uno de los tres niveles anteriores: estratégico, táctico y operativo para el tercer, segundo y primer nivel respectivamente. Las decisiones que se toman en el tercer y segundo nivel dan lugar a los flujos de entrada y salida (representados por las flechas azules en la Figura 3) a los que se les llama condiciones de contorno. Las condiciones de contorno determinan el conjunto de relaciones que en el primer nivel adquieren los subsistemas [4] (representadas por las flechas bidireccionales).

Las limitaciones del proyecto en cuanto al uso de la tecnología de videoconferencia se pueden explicar, por un lado, porque la estrategia aplicada se realizó desde el segundo nivel del modelo analítico sin considerar la dinámica de los subsistemas del primer nivel. Esta situación es muy común en la mayoría de los proyectos que abordan la brecha digital, en los cuales se intenta convencer a los beneficiarios de la tecnología de los beneficios que se obtienen al usarla. Esto da como resultado que en la mayoría de los casos la infraestructura es subutilizada o abandonada por carecer de una utilidad práctica para los usuarios.

Con el objeto de lograr participación y apropiación comunitaria en el despliegue de acceso a Internet, es importante identificar los actores involucrados en

la problemática estudiada. En este caso, los usuarios de la infraestructura son claves en el proyecto de reducción de la brecha digital. En la Tabla 3 se muestran los roles de los actores que interactuaron en el proyecto.

Tabla 3. Cuadro de actores

Presidencia municipal de San Miguel Tlacotepec	Fungieron como promotores del proyecto con los miembros de la comunidad. Ofrecieron espacio físico para la instalación de la infraestructura; el pago del servicio de Internet; proporcionaron una persona para que se hiciera cargo del centro comunitario digital;
Equipo de investigadores	El equipo de investigación abordó la problemática en forma disciplinaria concentrándose en los subsistemas identificados en el modelo analítico.
Comité de migrantes de San Miguel Tlacotepec en la ciudad de Vista	Aportaron recursos para acondicionar el área del centro comunitario digital. Coordinaron las videoconferencias con los demás migrantes residentes en Vista.
Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID, por sus siglas en inglés)	Otorgó el financiamiento para la realización del proyecto.

La determinación de la estrategia para abordar la problemática de la brecha digital se tomó de los diagnósticos que se hicieron de los tres subsistemas. Al identificar la necesidad de comunicación entre las familias separadas por la migración a través del uso del teléfono, se consolidó el enfoque de buscar una solución tecnológica que respondiera a las necesidades y al contexto de SMT.

Considerando las observaciones anteriores, en este trabajo de tesis se partió de un esquema en donde los usuarios no tuvieran que asistir a un establecimiento (por ejemplo, centros comunitarios digitales) para hacer uso de la infraestructura de telecomunicaciones. Se planteó un escenario en que los hogares de la comunidades cuenten con cobertura de banda amplia a través de redes inalámbricas basadas en la especificación 802.11. Este escenario representó un cambio importante al modelo tradicional de dotar de CCD a las comunidades (en donde la infraestructura se encuentra centralizada) en las cuales la población tiene que acudir para hacer uso de la misma (ver Figura 4).

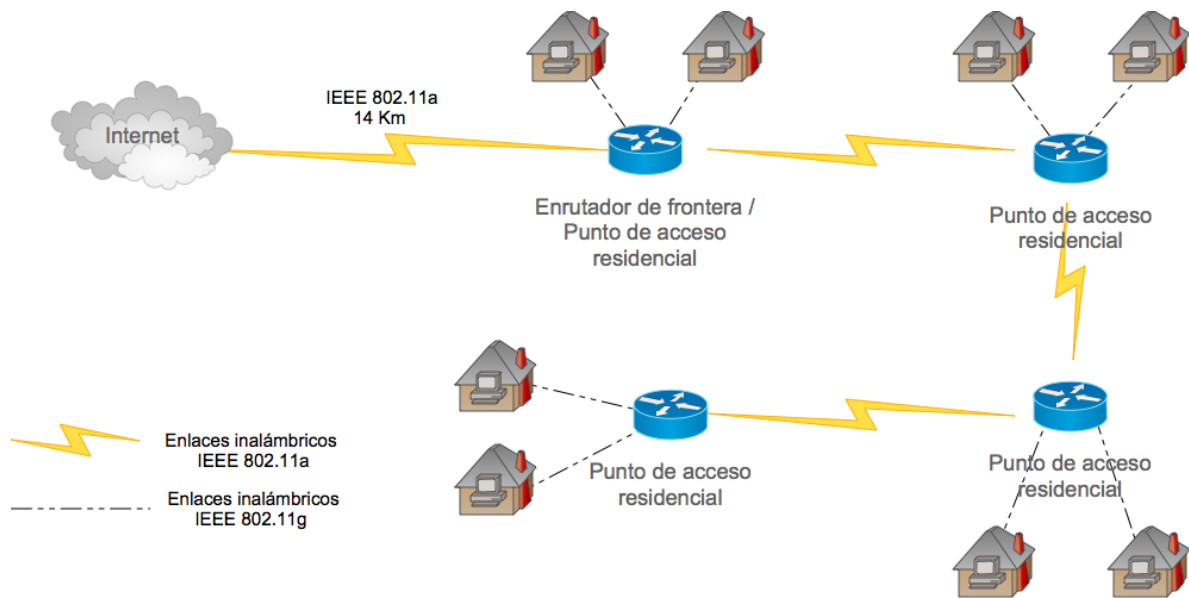


Figura 4. Esquema de conectividad propuesto

La dotación de banda amplia en los hogares abre la posibilidad de implementar aplicaciones de telecomunicaciones, como la telefonía residencial, que permitirían darle sustentabilidad a la infraestructura instalada. La telefonía, al ser un servicio al cual la mayoría de la población está familiarizado, tendría muy poco rechazo por parte de la población para ser usado dentro de los hogares. Al estarse solucionando la necesidad de comunicación telefónica, se estaría reduciendo considerablemente el rechazo, por parte de la población, a las nueva tecnologías. Posteriormente, se podrían ir agregando nuevas aplicaciones que vayan coadyuvando a la resolución de necesidades de comunicación e información por parte de la comunidades.

Para lograr esto, se propuso realizar modificaciones a los protocolos de comunicación de VoIP de tal manera que las redes 802.11 puedan ser una solución tecnológica viable para ofrecer el servicio de telefonía local en comunidades rurales, principalmente, aquellas que se encuentran alejadas de los centros urbanos.

4 Marco conceptual

4.1 Introducción

4.2 Ejemplos de proyectos para reducir la brecha digital en comunidades rurales

Debido al bajo costo de los dispositivos WLAN y su facilidad de operación, las redes WLAN pueden ser utilizadas para dotar de infraestructura de telecomunicaciones a comunidades rurales, que por su baja densidad poblacional o aislamiento geográfico no son atendidas por las empresas de telecomunicaciones. Esto es muy importante, porque las WLAN pueden coadyuvar en disminuir la brecha digital que existe entre las comunidades urbanas y rurales en México.

Los primeros esfuerzos que realizó el gobierno mexicano para reducir esta brecha digital se centraron principalmente en la instalación de infraestructura de telecomunicaciones, principalmente de acceso a Internet, en comunidades que no contaban con dicha infraestructura [16]. En el año 2000 dio inicio el programa e-

México [18], el cual tenía el objetivo de reducir la brecha digital entre los gobiernos, las empresas, los hogares y los individuos. Los tres ejes principales de la propuesta fueron:

- **Conectividad**, la cual consistía en la instalación de Centros Comunitarios Digitales (CCD) con equipo de cómputo y acceso a Internet, principalmente en comunidades que contaban con una limitada o nula infraestructura de telecomunicaciones;
- **Contenido**. Desarrollo de contenidos que pudieran ser de utilidad para las comunidades, como aspectos de educación, salud, información y trámites gubernamentales y economía;
- **Sistemas**. Este eje está relacionado con la creación del portal e-México y la administración de la red.

Sin embargo, aunque en los primeros cinco años se instalaron poco más de 7,000 CCD, se descuidaron algunos aspectos sociales que impidieron que la infraestructura impactara en el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales en donde se instalaron: nivel educativo, diseños de contenidos que no fueron necesariamente de utilidad para las comunidades, y una falta de adopción de la tecnología por los usuarios limitaron su utilización. Al igual que en muchos países en desarrollo, los centros digitales fueron utilizados en su mayoría por estudiantes para realizar actividades escolares y de entretenimiento, sin que el resto de la población se haya involucrado [17].

Uno de los aspectos importantes para reducir la brecha digital, es buscar cómo las comunidades pueden hacer uso de la infraestructura de telecomunicaciones para mejorar sus niveles de vida. En este sentido, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí llevó a cabo un proyecto para estudiar la aplicabilidad del teletrabajo en comunidades rurales aisladas [19]. El objetivo del proyecto fue estudiar si es posible capacitar a estudiantes de una comunidad rural indígena en aspectos de TIC para que tuvieran la capacidad de ofrecer soporte técnico remoto a usuarios de una empresa de telecomunicaciones. El proyecto se desarrolló en una comunidad mayoritariamente

indígena y con un alto índice de marginación en el cual se capacitó a un grupo de estudiantes de la Universidad Indígena de San Luis Potosí para que pudieran ofrecer soporte técnico a usuarios que hacen uso de servicio de Internet dentro del estado. La capacitación se centro en las fallas más comunes de acceso a Internet que los usuarios de Internet pueden llegar a tener, así como en aspectos relacionados con el uso de navegadores de Internet. Los resultados obtenidos fueron favorables debido a que los conocimientos técnicos que se ofrecieron a los estudiantes fueron asimilados con relativa facilidad. Los resultados también mostraron que, además de los conocimientos técnicos, es necesario capacitar en otros aspectos como el uso del lenguaje, ampliar su vocabulario y su seguridad al hablar para mantener conversaciones más fluidas.

La mayoría de los proyectos para reducir la brecha digital incluyen la donación e instalación de infraestructura de telecomunicaciones, la cual difícilmente podría ser adquirida por las comunidades que se ven beneficiadas por estos proyectos. Cuando los proyectos terminan, en la mayoría de los casos la infraestructura permanece en la comunidad, sin embargo, el costo del mantenimiento del equipo y el costo de subsidiar el servicio de telecomunicaciones puede llevar a dejar de operar la infraestructura. Como una respuesta a la búsqueda de la sustentabilidad de la infraestructura de telecomunicaciones, en algunas regiones de Latinoamérica se ha explorado el concepto de *Microtelcos* [20].

Los Microtelcos son cooperativas, principalmente rurales, que se forman con miembros de la propia comunidad y nacen con el fin de satisfacer la necesidades de comunicación en comunidades de bajos recursos en donde las empresas de telecomunicaciones no tienen mucho interés en invertir. Por lo general, son promovidas por actores gubernamentales, privados y sociales. Argentina, Brasil, Perú y Colombia son algunos países de América del Sur en donde se ha desarrollado exitosamente este concepto. Las experiencias de estos países muestran que el desarrollo de estas cooperativas han coadyuvado en la provisión de servicios de telecomunicaciones en zonas donde las empresas de comunicaciones no tienen interés de invertir. Aunque en muchos de los casos, entidades gubernamentales han

participado en la promoción de las cooperativas, existen aspectos regulatorios que se tienen que resolver para dar certidumbre jurídica a las cooperativas además de aspectos de capacitación, especialmente, en el área de negocios.

4.3 Transmisión de VoIP como alternativa de comunicación en poblaciones rurales

Antes de la llegada del Internet, la mayoría de las comunicaciones telefónicas se realizaban a través de las redes de conmutación de circuitos de las empresas telefónicas. El establecimiento de una llamada requería que se estableciera un circuito lógico entre los extremos de la comunicación el cual no podía ser utilizado por otro usuario durante la duración de la llamada [21].

Con el desarrollo de las redes de conmutación de paquetes como el Internet, se abrió la posibilidad de compartir recursos de la red de manera casi simultánea, reduciendo de esta manera los costos de operación. La idea de utilizar el Internet para realizar llamadas telefónicas se consolidó en 1995 con la aparición de la primera aplicación de voz sobre IP: el *Internet phone* [22]. Posterior a esto, el número de usuarios ha crecido exponencialmente. De acuerdo a [23], a finales del 2010, el número de usuarios a nivel mundial sobrepasó los 140 millones.

En la Figura 5 se muestran algunos de los principales elementos que integran una aplicación de VoIP, los cuales se describen brevemente a continuación:

Conversión analógica a digital (A/D) y digital a analógica (D/A). La conversión analógica a digital convierte las variaciones de voltaje de una señal analógica a una señal discreta binaria, para su procesamiento y transmisión. El proceso de conversión digital a analógico convierte una señal binaria a una señal analógica para ser reproducida por la aplicación.

CÓDEC. Las principales funciones de los códec son: 1) comprimir una señal digital para que la transmisión de ésta requiera de un menor ancho de banda, y 2) descomprimir la señal que recibe desde la red para enviarla al convertidor D/A

Paquetizador IP. Encapsula las muestras comprimidas de voz en paquetes RTP/UDP/IP para que puedan ser enviadas a través de la Internet o de cualquier red que utilice el protocolo IP.

Enrutador. Se encarga de enviar los paquetes IP a través de la Internet hasta el nodo destino.

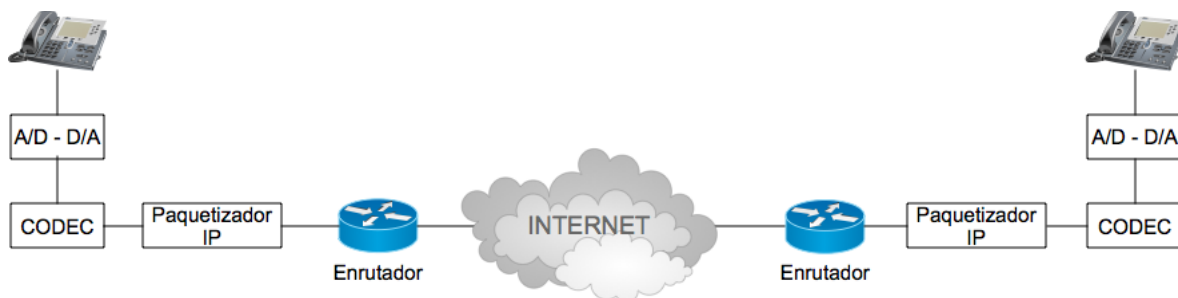


Figura 5. Elementos que integran una aplicación VoIP

Uno de los elementos más importantes dentro de un sistema VoIP es el códec ya que, por un lado, hace factible la transmisión de señales de voz a través de enlaces de baja velocidad y por otro lado, en enlaces de banda ancha permite multiplexar una gran cantidad de llamadas. Entre los códec más utilizados para las aplicaciones de VoIP [24] podemos encontrar al G.711, G.729A, G.723.1 y G.726 [25-28] (Tabla 4).

Tabla 4. Características principales de los códec

CÓDEC	Tasa de transmisión	Tiempo de trama de voz	Tramas de voz por paquete	Tiempo del paquete	Bytes por paquete
G.711	64 kbit/s	10 ms	2	20 ms	160
G.729A	8 kbit/s	10 ms	2	20 ms	20
G.723.1	5.3 kbit/s	30 ms	1	30 ms	24
G.726	32 kbit/s	10 ms	4	20 ms	80

4.3.1 Protocolos de comunicación usados en VoIP

Las aplicaciones de Internet son desarrolladas de acuerdo a la arquitectura del sistema abierto de interconexión (OSI, por sus siglas en inglés). Esta arquitectura define siete capas de operación las cuales abarcan desde las aplicaciones hasta la transmisión por el canal de comunicación de los bits de información.



Figura 6. Capas correspondientes a la arquitectura OSI

Desde el punto de vista de la red, las primeras cuatro capas (de abajo hacia arriba) son las que están directamente relacionadas con la comunicación de datos. En VoIP, los protocolos de comunicación que intervienen en la transmisión de paquetes de voz por medio de una red local inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés) son:

- Protocolo de transporte en tiempo real (RTP, por sus siglas en inglés) [29] y el protocolo de datagramas de usuario (UDP, por sus siglas en inglés) [30] los cuales funcionan en la capa 4.
- El protocolo de Internet (IP) [31] el cual funciona en la capa 3
- Los protocolos de capa 2 y capa 1 son los correspondientes a la especificación IEEE 802.11 Anexo g [32].

4.4 Impacto de los encabezados en el tamaño de las tramas de VoIP

Uno de los principales problemas que enfrentan las aplicaciones de VoIP para la transmisión en redes inalámbricas tiene que ver con el sobreencabezamiento que cada uno de los protocolos que intervienen agregan a los paquetes de voz que son producidos por el códec. Si consideramos el códec G.729A, el cual es de los más utilizados en aplicaciones de VoIP en Internet debido a su reducido requerimiento de

ancho de banda y capacidad de procesamiento [33], de la Tabla 4 podemos obtener que el tamaño de los paquetes producidos por el códec son de 20 bytes cada uno. Una vez que el códec ha producido un paquete con dos muestras de voz, el paquete es procesado por el protocolo RTP, el cual agrega un encabezado con 12 bytes como se muestra en la Figura 7.

Bytes	BITS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Version		P	X	CC			
2	M	PT (7 bits)						
3	Número de secuencia (16 bits)							
4								
5	Marca de tiempo (32 bits)							
6								
7								
8								
9	SSRC (32 bits)							
10								
11								
12								
13	20 bytes de voz (160 bits)							
.								
.								
.								
32								

Figura 7. Paquete de voz más el encabezado RTP

En este punto, los bytes del encabezado representan el 37.5% de la longitud del paquete. Para obtener una descripción puntual de cada uno de los campos del encabezado RTP, puede referirse al RFC 1889 [29]. Una vez que el paquete fue procesado por el protocolo RTP, el paquete es procesado por el protocolo UDP, el cual agrega ocho bytes de encabezados al paquete RTP (ver Figura 8).

Bytes	BITS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Puerto origen (16 bits)							
2								
3	Puerto destino (16 bits)							
4								
5	Longitud (16 bits)							
6								
7	Suma de verificación (16 bits)							
8								
9	Version	P	X	CC				
10	M	PT (7 bits)						
11	Número de secuencia (16 bits)							
12								
13	Marca de tiempo (32 bits)							
14								
15								
16								
17	SSRC (32 bits)							
18								
19								
20								
21	20 bytes de voz (160 bits)							
.								
.								
40								

Figura 8. Paquete de voz, mas el encabezado de RTP y UDP

Para ver una descripción detallada de los campos del encabezado UDP, puede referirse al documento RFC 768 [30]. En este punto, los bytes de encabezado representan el 50% de la longitud total del paquete. Posteriormente, el paquete UDP es procesado por el protocolo IP el cual agrega 20 bytes de encabezados. En la Figura 9 se muestra el encabezado IPv4 (versión 4 del protocolo IP) agregado al paquete.

Bytes	BITS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Version				IHL			
2	DSCP (6 bits)					ECN		
3	Longitud (16 bits)							
4								
5								
6								
7	Banderas			Posición de fragmento (13 bits)				
8	Tiempo de vida (16 bits)							
9								
10	Protocolo (16 bits)							
11	Suma de verificación de encabezado (16 bits)							
12								
13	Dirección IP origen (32 bits)							
14								
15								
16								
17	Dirección IP destino (32 bits)							
18								
19								
20								
21	Puerto origen (16 bits)							
22								
23	Puerto destino (16 bits)							
24								
25	Longitud (16 bits)							
26								
27	Suma de verificación (16 bits)							
28								
29	Versión	P	X	CC				
30	M	PT (7 bits)						
31	Número de secuencia (16 bits)							
32								
33	Marca de tiempo (32 bits)							
34								
35								
36								
37	SSRC (32 bits)							
38								
39								
40								
41	20 bytes de voz (160 bits)							
.								
.								
60								

Figura 9. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP e IPv4

Una vez que el paquete ha sido procesado por los protocolos RTP, UDP e IP, los 40 bytes del encabezado representan el 66% del tamaño del paquete completo. Si consideramos la versión 6 del protocolo IP (IPv6) [34], el cual contiene un encabezado de 40 bytes, la cantidad de bytes de encabezado aumentaría a 60 bytes, es decir, representaría el 75% del tamaño del paquete de VoIP (ver Figura 11).

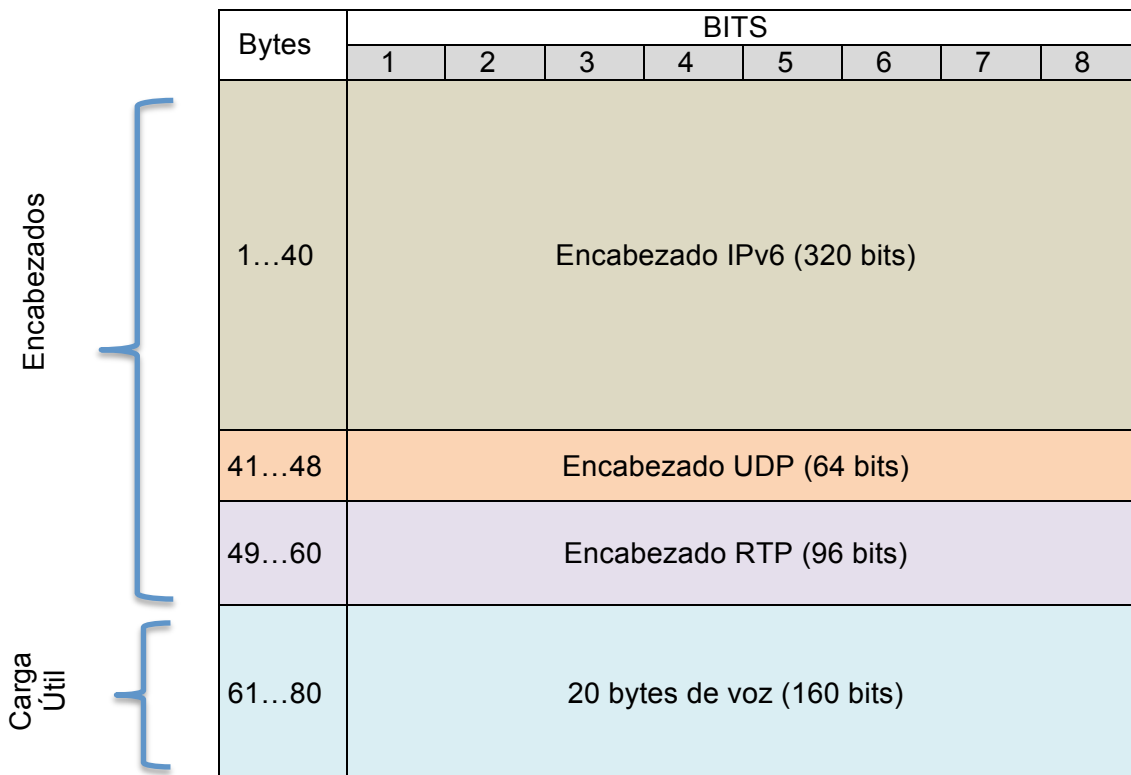


Figura 10. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP e IPv6

Finalmente, una vez que se tiene completo el paquete IP, este es enviado a la capa MAC para que pueda ser enviado al siguiente nodo. Al igual que los protocolos anteriores, el protocolo MAC de la interfaz 802.11 añade 28 bytes de encabezamiento al paquete IP, donde 24 bytes corresponden a información de control y los cuatro restantes, se anexan al final de la trama como mecanismo para detectar errores en la transmisión. En la Figura 11 se muestra un paquete completo de VoIP para su transmisión en una red inalámbrica.

Bytes	BITS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Control de trama							
2								
3	Duración							
4								
5...10	Dirección 1 (6 bytes)							
11...16	Dirección 2 (6 bytes)							
17...22	Dirección 3 (6 bytes)							
23	Control de secuencia							
24								
25...64	Encabezado IPv6 (320 bits)							
65...72	Encabezado UDP (64 bits)							
73...84	Encabezado RTP (96 bits)							
85..104	20 bytes de voz (160 bits)							
105	MAC CRC							
106								
107								
108								

Encabezados

Carga Útil

Sufijo MAC

Figura 11. Paquete de voz con el encabezado RTP, UDP, IPv6 y MAC

Juntando todos los encabezados, de los 108 bytes que componen la trama de VoIP, 88 corresponden a encabezados, es decir, el 81% del tamaño de la trama. Esta característica disminuye la eficiencia de cualquier canal de comunicaciones. Aplicar

técnicas que disminuyan la cantidad de información de control que se tiene que enviar, incrementará la eficiencia del medio de comunicación y repercutirá en otros aspectos, como el consumo de energía.

4.5 Trabajos relacionados a la compresión de encabezados

En esta sección se presentan algunos trabajos enfocados a reducir el tamaño de los encabezados para incrementar la eficiencia de la transmisión. Los primeros esquemas de compresión se diseñaron para resolver los problemas del reducido ancho de banda de los primeros accesos remotos (dial-up). Debido a que por lo general se trataban de enlaces dedicados de baja velocidad, la tasas de error eran bajas y no significaban muchos problemas para los esquemas propuestos. La aplicación de estos esquemas en redes inalámbricas, en donde se presentan altas tasas de error debido a la manera en que se propagan las señales de radios y al uso de interfaces *half-duplex*, requirieron de diseños más robustos de los esquemas de compresión, de tal manera que los contextos se mantuvieran sincronizados a pesar de ocurrir errores en las transmisiones.

Las primeras discusiones sobre reducir el tamaño de los encabezados TCP/IP se llevaron a cabo a mediados de la década de 1980 cuando los accesos más comunes para conectar computadoras eran de 1200 bauds y la aplicación más usada era Telnet. La aplicación de Telnet envía un paquete TCP/IP por cada tecla que se oprime en el teclado. Esto quiere decir que se deben enviar 41 bytes (un byte de la letra, más 40 bytes del encabezado TCP/IP) por cada letra oprimida. Considerando una velocidad de 1200 bauds, se pueden transmitir cerca de tres caracteres por segundo. En 1984 se publicó el documento RFC 914 (Request For Comments), donde se presentaron propuestas para comprimir el tamaño de los paquetes de telnet de 41 bytes a 17 y 13 bytes [35]. La compresión se logró por el hecho de que cerca de la mitad de los campos que forman el encabezado TCP/IP no cambian durante una transmisión (se mantienen estáticos). Para los campos que si cambiaban, se presentó por primera vez la idea de utilizar plantillas de encabezados TCP/IP sincronizadas entre el transmisor y el receptor. Cuando se iba a crear una nueva conexión, se almacenaba una copia del encabezado del paquete actual (plantilla). Cuando se iba a transmitir un nuevo

paquete, se comparaba el encabezado del nuevo paquete con la plantilla almacenada. Se obtenían las diferencias de los campos que cambiaban de forma predeterminada y se generaba un nuevo encabezado que contenía los campos que cambiaban aleatoriamente y las diferencias computadas.

Al recibir el descompresor el encabezado comprimido, se creaba un nuevo encabezado utilizando como referencia la información de la plantilla almacenada. En seguida se actualizaban los campos aleatorios del nuevo encabezado con los campos correspondientes del paquete recibido y se actualizaban los campos dinámicos sumando el valor almacenado en la plantilla con los valores recibidos en el encabezado comprimido. Finalmente, la plantilla es actualizada con la información del nuevo encabezado por lo que la plantilla siempre contenía los campos del último paquete recibido. En el documento solo se describía la idea pero no se especifica un algoritmo para realizar la compresión de los encabezados.

En [36] se presentó la primer propuesta de estándar para la compresión de encabezados TCP/IP (CTCP), la cual consideraba nuevas aplicaciones, como correo electrónico y la transferencia de archivos, entre otras. Sin embargo, no consideraba aplicaciones que utilizarán el protocolo UDP, debido a que a principios de la década de los 90, no había muchas aplicaciones que hicieran uso de este protocolo. La propuesta se basaba fundamentalmente en lo propuesto en [35], pero incrementando la eficiencia de compresión al reducir de 13 a 3 bytes en promedio el tamaño del encabezado comprimido. El incremento en la eficiencia se logró considerando que no todos los campos cambiaban al mismo tiempo, por lo que el paquete con el encabezado comprimido solo se incluía los campos que cambiaron con respecto al encabezado anterior. Para esto, el primer byte del encabezado contenía una serie de bits que indicaban qué campos se incluían como parte del encabezado. El valor que se transmitía era la diferencia entre el valor actual y el anterior.

Una característica importante de la propuesta era que por cada conexión TCP diferente, se mantenía un “contexto” (una copia del último encabezado de la conexión), tanto en el transmisor como en el receptor. Cada contexto estaba definido por los campos de las direcciones IP y los puertos TCP. Para mantener sincronizados

ambos contextos, CTCP utilizaba el mecanismo de confirmación de paquete recibido (ACK) del protocolo TCP. Cuando existía un error y no se recibía el paquete de confirmación, el protocolo TCP retransmitía el último paquete enviado. Cuando el compresor detectaba que se iba a retransmitir un paquete, este asumía que se perdía la sincronía con el contexto del descompresor por lo que enviaba un paquete con el encabezado completo para que descompresor pudiera restablecer el contexto. De esta manera, no era necesario establecer una señalización entre el descompresor y el compresor para restablecer el contexto.

Para comprimir los encabezados de aplicaciones de audio y video, se desarrolló el mecanismo de compresión cRTP (Compressed Real Time Protocol) el cual comprimía los encabezados RTP/UDP/IP [37]. Al igual que CTCP, cRTP requería que el compresor y el descompresor compartieran un contexto por cada sesión de RTP. En este caso, cada contexto estaba definido por las direcciones IP y los puertos UDP, así como por el campo SSRC del protocolo RTP. cRTP permitía reducir el tamaño del encabezado de 40 bytes (12 bytes del encabezado RTP más 8 bytes del encabezado UDP y 20 bytes del encabezado IP) a dos o cuatro bytes. El principio de la compresión era similar al presentado en [36] y para incrementar la eficiencia de compresión, se tomó en cuenta una característica de los campos del encabezado RTP: la mayoría de los campos dinámicos (aquellos que cambian de un paquete a otro) lo hacían con un valor constante entre paquetes consecutivos. Ejemplos de esto eran los campo de *número de secuencia* el cual se incrementa por uno en cada paquete consecutivo y el campo de *marca de tiempo*, el cual se incrementaba en función de la frecuencia de muestro del códec (para el códec G.729A, el incremento era de 160) la cual se mantenía constante durante toda la sesión. En lugar de transmitir el incremento, éste se almacenaba con la información del contexto correspondiente a la sesión. En caso de que al momento de la compresión se detectara que el campo no se incrementaba de acuerdo al valor almacenado, se transmitiría el nuevo incremento dentro del encabezado comprimido.

Debido a que el protocolo UDP no está orientado a conexión, no existía una forma implícita para notificarle al compresor que el descompresor había perdido el

contexto. En estos casos, el descompresor requería enviar un paquete al compresor para indicarle esta situación. Cuando el compresor recibía este paquete, enviaba un paquete con el encabezado completo para que el descompresor pudiera restablecer el contexto. De igual manera, cuando el descompresor detectaba en el campo de número de secuencia que un paquete no se recibió, automáticamente invalidaba el contexto y enviaba un paquete de notificación al compresor para que éste enviara un paquete sin el encabezado comprimido. Cabe mencionar, que mientras el contexto era restablecido, todos los paquetes recibidos eran descartados por el descompresor.

Una de las debilidades principales de los esquemas anteriores es que fueron diseñados para redes alámbricas, donde la tasa de error era menor a 10^{-4} . Debido a que las redes alámbricas presentaban altas tasas de error (mayores a 10^{-4}), estos mecanismos reducían su eficiencia considerablemente debido a que constantemente tenían que estar enviando encabezados sin comprimir para restablecer los contextos. El mecanismo ROHC, propuesto en [38], fue diseñado para canales de comunicación con una alta tasa de errores como los canales inalámbricos. Una de sus características principales era que privilegiaba mantener sincronizado los contextos sobre el uso del ancho de banda en condiciones de una tasa alta de errores.

La operación del mecanismo de compresión se puede representar por medio de diagramas de estados finitos. El compresor y el descompresor constan de tres estados los cuales no necesariamente se encuentran sincronizados, es decir, el compresor puede estar en el estado dos mientras que el descompresor puede estar en el estado tres (ver Figura 12).

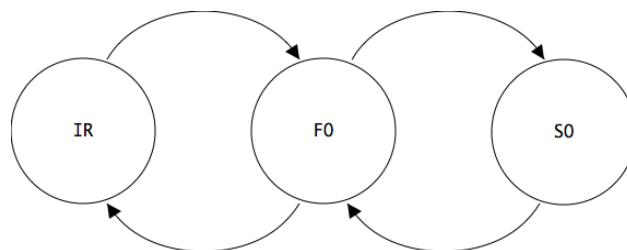


Figura 12. Diagrama de estados del compresor ROHC

Estado de inicialización o actualización (IR). El propósito de este estado es iniciar el proceso de establecer el contexto en el descompresor. También es utilizado cuando se requiere restablecer un contexto existente. En este estado se transmiten al descompresor los campos estáticos, dinámicos e información adicional para establecer el contexto.

Estado de primer orden (FO). El compresor entra en este estado cuando se requiere que el descompresor identifique el patrón de cambio de algunos de los campos dinámicos. A este estado se puede entrar después del estado IR o del estado de segundo orden (SO), debido a un cambio en el patrón de cambio en los campos dinámicos.

Estado de segundo orden (SO): Este es el estado de máxima compresión y se llega a éste cuando el descompresor le notifica que se ha establecido el contexto por completo. Cuando alguno de los campos dinámicos presenta un cambio que es diferente al del paquete anterior, el compresor automáticamente se regresa al estado FO para reprogramar el contexto en el descompresor.

Idealmente, el compresor siempre se mantendrá en el estado SO, sin embargo, puede regresarse al estado FO o incluso al IR si se detecta que muchos paquetes no han sido descomprimidos correctamente.

El descompresor, dependiendo de qué tan completo esté el contexto, puede estar en los siguientes tres estados (ver Figura 13):

Sin contexto (NC). En este estado el descompresor recibe paquetes del estado IR del compresor para establecer el contexto. En este punto los paquetes recibidos incluyen los campos estáticos y dinámicos.

Contexto estático (SC). El contexto está formado por los campos estáticos y aún no tiene información sobre los campos dinámicos. En este estado, los encabezados comprimidos que se reciben contienen cambios en los campos dinámicos que son utilizados por el descompresor para establecer la función que determina la manera en que los campos dinámicos cambian entre paquetes consecutivos.

Contexto completo (CC). En este estado el contexto se ha completado al 100% y el descompresor no requiere más de la información de los campos dinámicos. Se puede extrapolar el valor de los campos dinámicos a partir de la información que tiene almacenada en el contexto. Mientras los encabezados recibidos se puedan descomprimir sin error, el descompresor se mantendrá en este estado. En caso de que se presente una variación no esperada de los campos dinámicos, se regresará al estado de contexto estático para volver a restablecer el contexto.

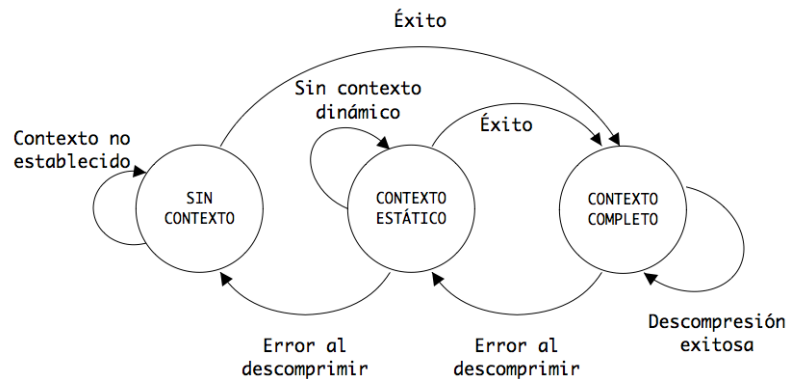


Figura 13. Diagrama de estados de descompresor ROHC

La robustez de este mecanismo se basa en el uso exhaustivo del canal de inalámbrico para confirmar los cambios de estado. El compresor no pasará al siguiente estado hasta recibir la confirmación por parte del descompresor de que el contexto se encuentra establecido correctamente. La ganancia obtenida en la reducción del tamaño del encabezado puede verse mermada por la introducción de paquetes de señalización que tienen el objetivo de evitar la pérdida de sincronización de los contextos entre el compresor y el descompresor.

Los esquemas anteriores requieren de mantener sincronizados los contextos en el compresor y el descompresor. Considerando que el canal inalámbrico es poco confiable y que las tasas de error pueden ser relativamente altas, algunos autores han propuesto esquemas de compresión que no requieren mantener contextos. La ventaja de no mantener contextos, es que no hay necesidad de mantenerlos sincronizados, por

lo que no se requiere introducir un protocolo de señalización que en las WLAN puede reducir el ancho de banda disponible para la transmisión de datos.

En [39] se presenta un esquema que no requiere mantener estados y evita el uso de contextos, por lo menos al nivel de la capa IP. Su característica principal es que en lugar de utilizar contextos, se auxilia de las tablas de enrutamiento que existen en los enrutadores. Las direcciones IP son mapeadas a través de códigos de pocos bits que residen en las tablas de enrutamiento de los enrutadores. Para los otros campos del encabezado IP, se utilizan una serie bits que indican si el valor del campo es diferente al valor esperado, por ejemplo, si el campo de versión es cuatro o seis, si el protocolo de transporte es TCP u otro, etc. De esta manera, no es necesario que el compresor y el descompresor compartan un contexto, lo que evita que se descarten paquetes cuando se pierde la sincronización del contexto, como en los mecanismos anteriormente vistos. Las desventajas de este esquema es que sólo funciona para la capa IP. Los encabezados de las capas UDP y RTP deben ser comprimidos de la manera tradicional, es decir, utilizando contextos. La idea de utilizar un mecanismo de compresión de encabezados que no use estados, es decir, sin la necesidad de estar constantemente actualizando los contextos, también se ha aplicado a las redes de sensores, como se puede observar en [40].

Un esquema que combina la compresión de campos estáticos y la agregación de paquetes se presenta en [41]. El objetivo del trabajo es reducir el tamaño del encabezado comprimiendo solamente los campos estáticos. Los campos dinámicos se transmiten en cada uno de los paquetes. Para compensar la baja eficiencia de compresión con respecto a los modelos comunes como cRTP y RoHC, proponen realizar una agregación de paquetes, es decir, transmitir más de un paquete IP en cada trama MAC. Con los paquetes agregados, se propone realizar una compresión de los campos dinámicos dentro de la trama MAC. En la Figura 14 se muestra el esquema de operación propuesto. El sistema realiza el proceso de compresión de los encabezados RTP/UDP/IP, creando un contexto en el compresor y el descompresor usando solamente los campos estáticos. Posteriormente los paquetes son procesados por un agregador de paquetes que concatena n paquetes en una sola trama MAC. Los

paquetes que se encuentran dentro de la trama, son analizados para extraer las redundancias que se puedan reconocer. Estas redundancias son agregadas en el encabezado de agregación, por lo que el tamaño de la trama se reduce.

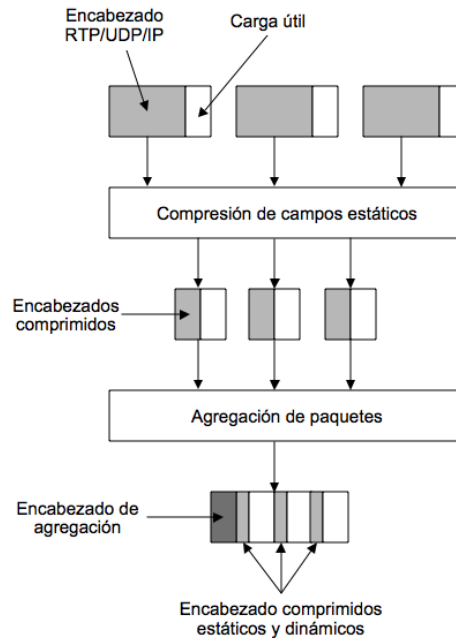


Figura 14. Esquema cooperativo de compresión de encabezados y agregación de paquetes. Modificado de [41].

A diferencia de los esquemas anteriores, en [42] se propone un esquema de compresión de encabezados de la capa MAC. Al igual que en los esquemas de compresión clásicos, la reducción del tamaño del encabezado se hace por medio del uso de contextos sincronizados entre el compresor y el descompresor. La compresión en la capa MAC requiere que las direcciones MAC no se transmitan en los encabezados. Para esto se debe utilizar un identificador de contexto que permita la comunicación inequívoca entre dos nodos. Los autores parten del supuesto que si dos nodos comparten una etiqueta de contexto para descomprimir paquetes, entonces los nodos no deben recibir paquetes que contengan esta etiqueta y el paquete esté dirigido al otro nodo. Para crear un nuevo contexto, el compresor debe escoger una etiqueta en forma aleatoria. Para esto se cuenta con dos tablas en donde se guardan las etiquetas usadas por el compresor y en la otra, las etiquetas que escucha en el

canal inalámbrico que están siendo usadas por otros compresores. Debido a la naturaleza aleatoria en que el compresor obtiene la etiqueta de contexto, pueden ocurrir colisiones de etiquetas. Una colisión de etiquetas ocurre cuando un descompresor recibe un encabezado con una etiqueta de contexto que no está dirigida a ese descompresor. Para detectar colisiones de etiquetas, el compresor, antes de comprimir el encabezado, calcula el CRC (proceso de verificación de redundancia cíclica) el cual se anexa junto con el encabezado comprimido. El descompresor, al recibir un encabezado con una etiqueta válida, descomprime el encabezado y calcula el CRC del encabezado. Si los dos CRC son iguales, significa que la etiqueta si estaba dirigida a este descompresor. Si los CRC no son iguales, significa que ocurrió una colisión de etiquetas, por lo que el descompresor envía una trama de notificación de colisión (CNF, por sus siglas en inglés) al compresor que envió la trama comprimida.

En la Figura 15 se muestra un encabezado MAC. Los campos sombreados siempre son iguales entre un par compresor-descompresor. Los campos sombreados con puntos se mantienen constantes una vez que el nodo se asocia a una red y raramente cambian, a excepción del campo de retransmisión (*retry*). Los campos que presentan cambios en cada trama son el control de secuencia (*Seq Cntrl*) y el CRC. De acuerdo a esto, el encabezado comprimido estará formado por la etiqueta de contexto, el CRC y la codificación de la diferencia del número de secuencia. Cada par compresor-descompresor, mantendrá dos contextos, uno para cuando el campo *retry* es uno y otro para cuando el campo es cero.

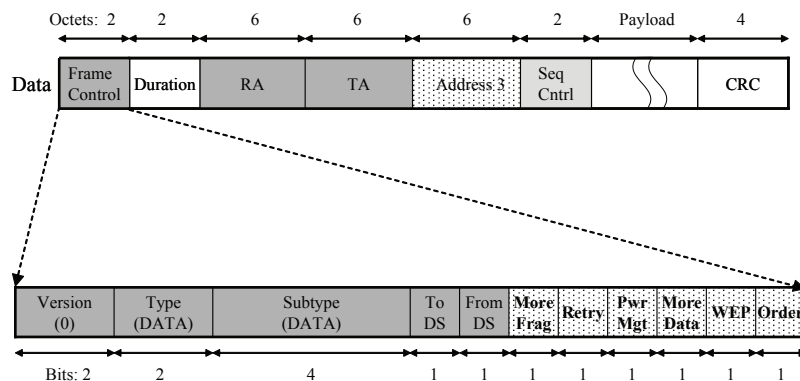


Figura 15. Encabezado MAC 802.11. Tomado de [42].

La desventaja de este esquema es la posibilidad de que se presenten colisiones de etiquetas, lo que requiere de un mecanismo para detectarlas, y de tramas de señalización para notificar al compresor de estas situaciones.

En las redes de sensores, los encabezados también pueden impactar la eficiencia del canal inalámbrico y la duración de las baterías. Al igual que en las aplicaciones de VoIP, la cantidad de datos que los sensores tienen que transmitir son del orden de 15 bytes, por lo que el tamaño de los encabezados puede llegar a representar hasta el 70% del tamaño del paquete. En [43] y [44] se propone utilizar un esquema de direccionamiento con direcciones cortas para disminuir el tamaño del encabezado de la capa MAC. La sustitución de las direcciones MAC globales (caracterizadas por ser largas) por direcciones locales (cortas), se basa en el hecho que no es necesario que todos los dispositivos que pertenecen a la red deban conocer la dirección MAC de un nodo que no esté a su alcance del radio. Es decir, solo los dispositivos vecinos y que estén al alcance del radio deben conocerla. De esta manera, al tener pocos vecinos, es posible utilizar direcciones con hasta un byte de longitud (256 direcciones únicas). El utilizar direcciones cortas permite reducir la cantidad de bits que se tienen que transmitir, disminuyendo así el consumo de energía.

5 Desarrollo tecnológico propuesto

5.1 Introducción

Como se mencionó anteriormente, los esquemas de compresión revisados realizan la compresión en la capa IP utilizando los campos estáticos y dinámicos. El esquema general de estos compresores es que cuando se detecta un nuevo flujo de VoIP, el compresor y el descompresor almacenan en su memoria una copia de los campos estáticos (creando un contexto). En el caso de los campos dinámicos, ambos procesos almacenan un valor de referencia (el valor actual del campo dinámico) y lo que se transmite es un valor codificado de la diferencia entre el valor del campo dinámico del paquete actual y el valor de referencia. El descompresor, al recibir un paquete con el encabezado comprimido, retira el encabezado comprimido y con la información que tiene almacenada y la información codificada, regenera el encabezado original.

Cuando ocurren pérdidas de paquetes, se corre el riesgo de que la sincronización entre el compresor y el descompresor se pierda y sea necesario

establecer nuevamente el contexto. Cuando ocurre esto, el descompresor se vale de paquetes de señalización para indicarle al compresor que se ha perdido la sincronización.

Para evitar el uso de paquetes de señalización y de paquetes de restablecimiento de contextos, se propone un esquema de compresión en donde los contextos solo incluyan la información de los campos estáticos de los encabezados RTP, UDP e IPv6. En la Figura 16, los campos sombreados indican los campos estáticos y los campos con fondo blanco indican los campos dinámicos.

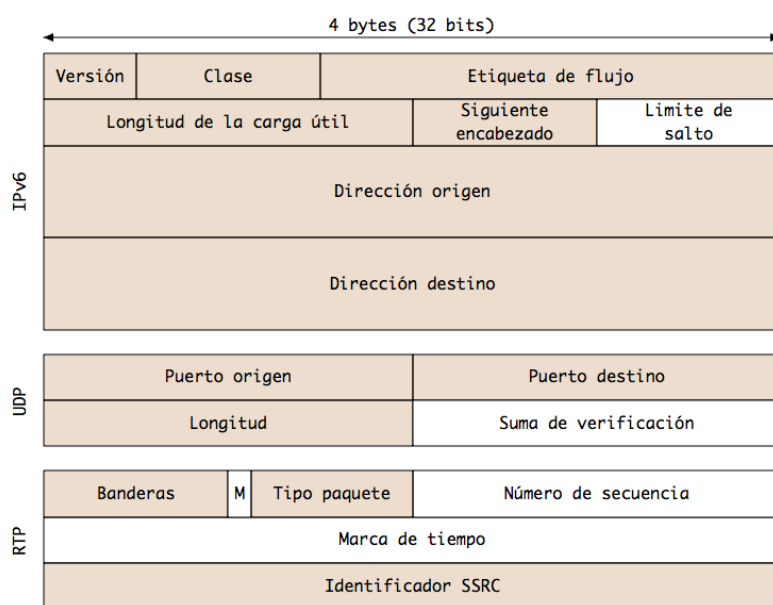


Figura 16. Campos estáticos de los encabezados RTP, UDP e IPv6

De acuerdo a la figura anterior, los campos que se transmitirán en los encabezados comprimidos son: el *límite de salto*, del encabezado IPv6 y el *número de secuencia*, *marca de tiempo* y el bit *M* del encabezado RTP. El campo *suma de verificación* del encabezado UDP se omite y se deja la corrección de errores a la capa de enlace. En total son 7.125 bytes correspondientes a los campos dinámicos los que se incluirán en el encabezado comprimido.

Adicionalmente, se propone reducir el tamaño de las tramas de la capa MAC de la WLAN al utilizar un esquema de direccionamiento virtual. Las direcciones MAC contienen seis bytes y cada trama de datos requiere de al menos tres direcciones, es

decir, 18 bytes de direcciones. El esquema propuesto convierte las direcciones MAC de fábrica (las cuales tienen una cobertura global, ya que las direcciones MAC asignadas a cada interfaz inalámbrica son únicas e irrepetibles) a una dirección de local ocho bits. De esta manera, se reducen de 28 bytes a 13 bytes el tamaño del encabezado MAC.

Para calcular la eficiencia del mecanismo de compresión se utiliza la Ecuación 1.

$$E = \frac{\text{Carga útil}}{\text{Encabezado} + \text{Carga útil}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E es la eficiencia de compresión;

Carga útil es el tamaño de la muestra de voz en bytes (20 bytes);

Encabezado es el tamaño del encabezado en bytes

En la Tabla 5 se muestra una comparación de la eficiencia de compresión de los esquemas cRTP, RoHC y el propuesto. La comparación se realiza utilizando los encabezados RTP/UDP/IPv6/MAC.

Tabla 5. Eficiencia de compresión de los esquemas de compresión

	Tamaño del encabezado RTP/UDP/IP Bytes	Tamaño del encabezado MAC Bytes	Tamaño de la trama MAC Bytes	Eficiencia de compresión %
cRTP	3	28	31	39
RoHC	1	28	29	41
Propuesto	7.125	15	22.125	47

Utilizando el esquema propuesto, se observa en la Tabla 5 que es posible obtener un incremento en la eficiencia del 14% con respecto a RoHC y de un 20% con respecto a cRTP. Adicionalmente, se debe considerar que el esquema no es sensible a la pérdida de paquetes, por lo que los contextos no se verán afectados por la tasa de error del canal.

El esquema propuesto y su implementación fueron simulados mediante Opnet, que es una herramienta de simulación desarrollada por la empresa Opnet Technologies [45].

5.2 Esquema de compresión propuesto

5.2.1 Mecanismo de compresión de los encabezados RTP/UDP/IP

Para la implementación del mecanismo de compresión se definieron cinco tipos de paquetes, los cuales se identifican por los cuatro bits utilizados por el protocolo IP para identificar la versión del encabezado (ver Tabla 6).

Tabla 6. Paquetes de control del mecanismo de compresión RTP/UDP/IP

Campo <i>versión</i>	Tipo	Nombre
1000	Paquete RTP/UDP/IP comprimido	<i>pkt_comp</i>
1100	Paquete de solicitud de contexto v4	<i>pkt4_req</i>
1110	Paquete de solicitud de contexto v6	<i>pkt6_req</i>
1001	Paquete de confirmación de contexto	<i>pkt_ack</i>
1111	Paquete de indicación de pérdida de contexto	<i>pkt_err</i>

De la tabla anterior se puede observar que en los paquetes definidos por el esquema de compresión, el primer bit del campo *versión* es “1” por lo que no existe conflicto con el protocolo IP (de acuerdo al protocolo IP, los valores válidos para el campo *versión* son 0100 y 0110). En caso de que un nodo que no tenga implementado el mecanismo de compresión reciba un paquete comprimido (el primer bit del campo *versión* sea 1), simplemente lo descartará.

A continuación se describen brevemente las funciones de los paquetes de control definidos:

- a) *Paquete RTP/UDP/IP comprimido*. Este paquete transporta las muestras de voz utilizando un encabezado RTP/UDP/IP comprimido (incluye el identificador del contexto y los campos dinámicos). Se utiliza una vez que el contexto en el compresor y descompresor se ha establecido. El flujo de este paquete es del compresor al descompresor.

d) *Paquete de indicación de pérdida de contexto.* Se transmite del descompresor al compresor para notificar que el contexto indicado en el último paquete comprimido se perdió. Al recibir esta notificación, el compresor inicia el proceso de solicitar un nuevo contexto.

El mecanismo de compresión solo toma en cuenta los campos estáticos (ver la Tabla 7), los cuales son almacenados en la tabla de contextos, mientras que los campos dinámicos se acomodan dentro de la estructura del encabezado sin alterar el contenido de ellos.

Tabla 7. Campos estáticos de un paquete RTP/UDP/IPv6

Clase de tráfico	Etiqueta de flujo
Longitud del campo de flujo	Próximo encabezado
Límite de saltos	Dirección de origen
Dirección de destino	Puerto de origen
Puerto de destino	Longitud
Ver	Bit P
Bit C	Bit CC
SSRC	

La compresión de los encabezados inicia cuando se recibe un paquete de la capa IP que tiene el encabezado completo. La Figura 20 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de compresión de los encabezados RTP/UDP/IP.

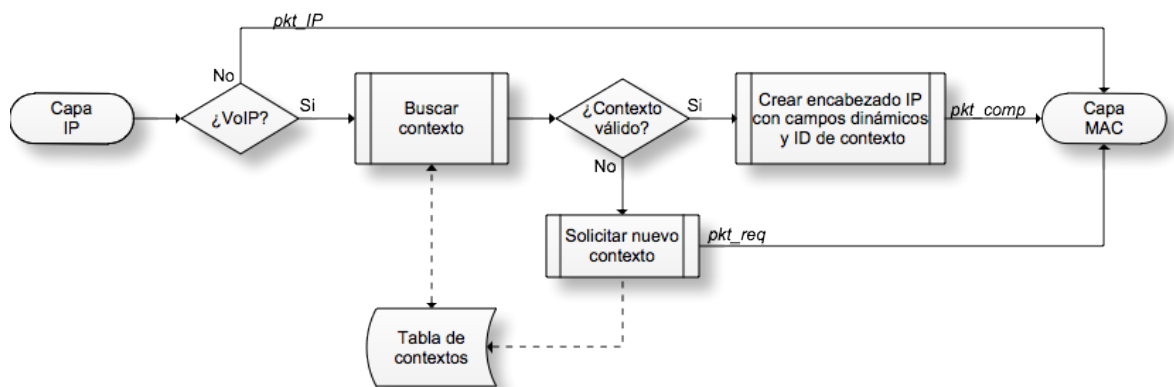


Figura 20. Esquema de compresión de los encabezados RTP/UDP/IP

Cuando un paquete llega al módulo de compresión, se analiza el paquete para determinar si es un paquete de VoIP: se revisa que el protocolo de la capa de transporte sea UDP (el valor del campo *Siguiente encabezado* sea 17) y que la longitud del paquete de la capa de transporte sea 40 bytes (correspondiente a 8 bytes del encabezado UDP mas 12 bytes del encabezado del paquete RTP más 20 bytes de la muestra de voz). Si el encabezado no cumple con estas dos condiciones, el paquete se envía sin ningún procesamiento al siguiente proceso del modelo de OPNET. Si el paquete cumple con estas condiciones, asumimos que el paquete corresponde a un paquete de VoIP.

El siguiente paso es determinar si ya existe un contexto establecido para este paquete. Un contexto es un registro que se almacena en los nodos que implementan mecanismos de compresión en donde se almacenan temporalmente los campos estáticos del encabezado RTP/UPD/IP de un flujo de VoIP. La Figura 21 muestra la estructura de un contexto para un flujo IPv6. Por cada flujo que se tenga, se genera un registro en la tabla de contextos. Los flujos se definen por las direcciones de origen y destino del encabezado IP así como los campos de los puertos de origen y destino del encabezado UDP. Cada registro tiene asociado un identificador único de 8 bits (*ID de contexto*), es decir, se pueden tener hasta 255 flujos de VoIP comprimidos (el valor "00000000" se reserva para indicar que el proceso de establecimiento del contexto está en trámite). Si el contexto no existe, se inicia el proceso de establecimiento del contexto.

ID de contexto	Campos estáticos	Tamaño (Bits)
ID de contexto	Versión	4
	Clase de tráfico	8
	Etiqueta de flujo	20
	Longitud del campo de datos	16
	Próximo encabezado	8
	Límite de saltos	8
	Dirección de origen	128
	Dirección de destino	128
	Puerto de origen	16
	Puerto de destino	16
	Longitud	16
	Ver	2
	P	1
	X	1
	CC	4
	PT	7
	SRCC	32
		415 (52 Bytes)

Figura 21. Representación de un contexto IPv6

Establecimiento de contextos

El flujo de paquetes entre el compresor y del descompresor para establecer un contexto se puede observar en la Figura 22

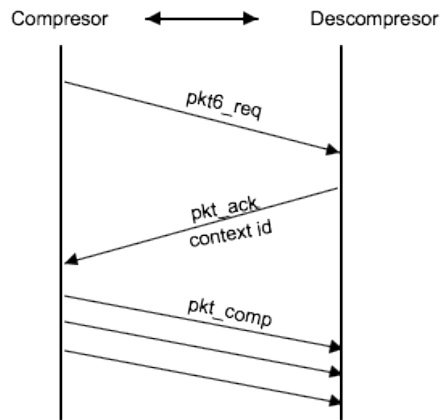


Figura 22. Flujo de comunicación para establecer el contexto

El proceso de establecimiento de contextos se inicia cuando se detecta un paquete de VoIP que no tiene un contexto asociado. El compresor modifica el campo *versión* del encabezado IP del paquete actual y le pone el valor "1110". Los demás campos se mantienen sin modificación. Antes de enviar el paquete, el compresor almacena en la tabla de contextos los campos estáticos de los encabezados RTP, UDP e IP del paquete. En este momento el compresor le asigna un identificador (ID) de contexto "00000000" para indicar que ya se solicitó el establecimiento del contexto pero aún no se recibe el ID.

Cuando el descompresor recibe una solicitud de establecimiento de contexto, busca en su tabla de contextos, utilizando los campos de direcciones y puertos del paquete recibido, si ya tiene un registro con esos datos. En caso de existir, obtiene el *ID del contexto* almacenado. En caso de que no exista, crea un nuevo registro con los campos estáticos del encabezado RTP/UDP/IP y genera un nuevo *ID*. Cuando obtiene el *ID*, envía un paquete *pkt_ack* al compresor para notificar el ID del contexto asignado y finalmente modifica el campo *versión* del paquete recibido con el valor correspondiente a la versión del encabezado IP utilizado y se envía a la capa superior para su procesamiento.

Cuando el compresor recibe el paquete *pkt_ack*, extrae el *id del contexto* y usando las direcciones IP y puertos UDP del mismo paquete, actualiza su tabla de contextos con el *id del contexto* en el registro correspondiente.

Transmisión de paquetes comprimidos

Con el contexto establecido, todos los paquetes que pertenecen al mismo flujo son procesados por el mecanismo de compresión, el cual extrae los campos dinámicos y los 20 bytes de la carga útil del paquete RTP para agregarlos en un nuevo paquete *pkt_comp* al cual se le adiciona también el id del contexto. El paquete original se desecha y se transmite a la capa MAC el paquete con el encabezado comprimido.

Descompresión de encabezados

El proceso de descompresión de los encabezados se realiza de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la Figura 23.

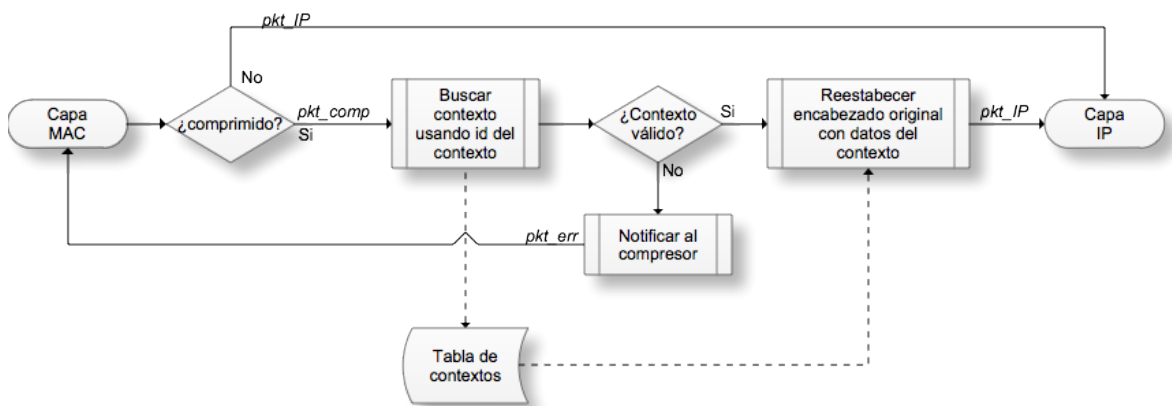


Figura 23. Proceso de descompresión de encabezados RTP/UDP/IP

Cuando se recibe un paquete de la capa MAC se analiza el campo de la versión para determinar el tipo de encabezado. Si es normal, el paquete se envía a la capa IP sin procesarlo. Si es comprimido, se extrae el ID del contexto y se busca en la tabla de contextos del nodo. Si no se encuentra un contexto válido, el paquete se descarta y se envía al compresor un paquete *pkt_err* para que se vuelva a crear un contexto para este flujo. Si el contexto es válido, se crea un nuevo encabezado RTP/UDP/IP con los campos del contexto y los campos dinámicos del paquete comprimido. Con el

encabezado creado y la carga útil, se crea un nuevo paquete el cual se manda a la capa IP para su posterior procesamiento. Finalmente, el paquete recibido con el encabezado comprimido es descartado.

5.2.2 Mecanismo de compresión de los encabezados MAC

El mecanismo de compresión de la capa MAC se basa en la sustitución de las direcciones MAC de 48 bits por direcciones virtuales de 8 bits. Si se considera que una trama MAC por lo general contiene tres campos de direcciones, la sustitución de direcciones permitirá obtener una reducción del 54% en el tamaño del encabezado MAC (ver Figura 24).

Bytes	Bits	0										1					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
	0	Protocol Version		Type		Subtype			To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Rsvd	
		Campo de control															
	2	Duración / ID (2 bytes)															
	4																
	8	Dirección 1 (6 bytes)															
	10																
	12																
	14	Dirección 2 (6 bytes)															
	16																
	18																
	20	Dirección 3 (6 bytes)															
	22																
	24	Control de secuencia (2 bytes)															
	26																
	28	Dirección 4 (6 bytes)															
	30																
	32	Carga útil (n bytes)															
	$32+n$																
	$32+n+2$	CRC (4 bytes)															

a)

Bytes	Bits	0										1					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
	0	Protocol Version		Type		Subtype			To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Rsvd	
		Campo de control															
	2	Duración / ID (2 bytes)															
	4	Dirección 1 (1 byte)								Dirección 2 (1 Byte)							
	6	Dirección 3 (1 byte)								Dirección 4 (1 Byte)							
	8	Control de secuencia (2 bytes)															
	10	Carga útil (n bytes)															
	$10+n$																
	$10+n+2$	CRC (4 bytes)															

b)

Figura 24. Encabezado MAC 802.11. a) Con direcciones de 48 bits y b) con direcciones virtuales de 8 bits

El uso de direcciones virtuales únicamente se implementa solamente para tramas de datos (*Type* = “10”). Para identificar las tramas que utilizan direcciones virtuales, se especificó el subtipo igual a “1000” (*Subtype* = “1000”).

La asignación de las direcciones virtuales se realiza en el momento en que una terminal cliente solicita asociarse a la BSS de un AP. Para la asignación se definieron dos tipos de tramas de gestión: 1) la trama de Solicitud de Asociación y Dirección Virtual (SADV) y 2), la trama de Respuesta de Asociación y Dirección Virtual (RADV) (ver Tabla 8). Como una estrategia para evitar agregar más tráfico de control, estas tramas sustituyen a las tramas de Solicitud de Asociación (SA) y Respuesta a Asociación (RA) definidos por la especificación 802.11. Estas nuevas tramas mantienen las funciones de las tramas reemplazadas, pero se agregan funciones específicas para el mecanismo de direccionamiento virtual. Una vez que las tramas son procesados por el mecanismo de compresión, se remueve toda la información relativa al mismo para posteriormente ser enviados a la capa MAC para su procesamiento normal.

Tabla 8. Tramas de gestión para el mecanismo de compresión de la capa MAC

Subcampo <i>Type</i>	Subcampo <i>Subtype</i>	Trama
11	0000	Solicitud de Asociación y Dirección Virtual
11	0001	Respuesta de Asociación y Dirección Virtual

Trama de Solicitud de Asociación y Dirección Virtual (SADV): Esta trama tiene la función de solicitar al AP la asignación de una dirección virtual. La Figura 25 muestra la estructura de la trama, la cual es similar a la trama de Solicitud de Asociación de la especificación 802.11, con la diferencia que los valores del subcampo *Type* se modificaron de “00” a “11” (ver campos sombreados con verde en la figura). Una vez que la trama es procesada por el mecanismo de compresión, la trama se pasa a la capa MAC para iniciar el proceso de asociación.

Bytes	Bits	0										1					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
	0	0	0	1	1	0	0	0	0	To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Rsvd
	2	Duración (2 bytes)															
	4	Dirección 1 (6 bytes)															
	8																
	10																
	12																
	14	Dirección 2 (6 bytes)															
	16	Dirección 3 (6 bytes)															
	18																
	20																
	22																
	24	Control de secuencia (2 bytes)															
	26	Información de capacidades (2 bytes)															
	28	Intervalo de escucha (2 bytes)															
	30	SSID (<i>n</i> bytes)															
	30+ <i>n</i>	Tasas de transmisión soportadas (<i>m</i> bytes)															
	30+ <i>n</i> + <i>m</i>	CRC (4 bytes)															
	30+ <i>n</i> + <i>m</i> +2																

Figura 25. Trama de Solicitud de Asociación y Dirección Virtual

Trama de Respuesta de Asociación y Dirección Virtual (RADV): La función de esta trama es notificar la dirección virtual asignada al equipo solicitante así como la dirección virtual del AP asociado. La estructura de la trama es similar a la de *Association Response*, con la diferencia del cambio de valores en el subcampo *Type* de “00” a “11” (ver la Figura 26). Adicionalmente a esta función, una vez que la trama es procesada por el mecanismo de compresión, la trama se pasa a la capa MAC para notificar la respuesta a la solicitud de asociación.

Bytes	Bits	0										1					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
	0	0	0	1	1	0	0	0	1	To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	WEP	Rsvd
	2	Duración (2 bytes)															
	4	Dirección 1 (6 bytes)															
	8																
	10																
	12																
	14	Dirección 2 (6 bytes)															
	16	Dirección 3 (6 bytes)															
	18																
	20																
	22																
	24	Control de secuencia (2 bytes)															
	26	Dirección virtual AP								Dirección virtual asignada							
	28	Información de capacidades (2 bytes)															
	30	Código de estado (2 bytes)															
	32	Identificador de asociación (2 bytes)															
	32+ <i>n</i>	Tasas de transmisión soportadas (<i>n</i> bytes)															
	32+ <i>n</i>	CRC (4 bytes)															
	32+ <i>n</i> +2																

Figura 26. Trama de Respuesta de Asociación y Dirección Virtual

El control de las asignaciones de las direcciones virtuales es llevada a cabo por el AP. Éste mantiene una tabla en memoria que relaciona las direcciones MAC de los equipos clientes con las direcciones de ocho bits asignadas por el AP. El rango posible de direcciones virtuales va desde “00000001” a “11111110”, lo que permite a cada AP manejar hasta 254 flujos con direcciones virtuales. Como regla, la dirección “11111111” siempre es asignada al AP.

Proceso de asignación de direcciones virtuales

La asignación se lleva a cabo en el proceso de asociación de una terminal cliente a un AP. Una vez que el cliente se ha autenticado con el AP, el mecanismo de compresión, en el cliente, captura la trama SA y la modifica para convertirla en una trama SADV y posteriormente enviarlo al AP para solicitar la asociación y la asignación de la dirección virtual.

Cuando el AP recibe la trama SADV, obtiene la dirección MAC del cliente y modifica el subcampo TYPE con el valor “00” (convirtiendo el marco SADV en SA) y lo reenvía a la capa MAC para que sea procesada la solicitud de asociación. Mientras tanto se queda en espera de que la capa MAC envíe la trama de respuesta a la solicitud de asociación. Cuando se recibe la trama RA, busca en la tabla de direcciones virtuales si ya tiene registrada una dirección virtual asociada a la dirección MAC del cliente. Si no la tiene asigna un dirección virtual que no esté siendo utilizada. Posteriormente, la trama RA se modifica para convertirla en una trama RADV, modificando el subcampo *Type* con el valor “11” e insertando la dirección virtual asignada al cliente en el cuerpo de datos de la trama.

Cuando la terminal cliente recibe una trama RADV, la dirección virtual asignada por el AP se extrae de los primeros ocho bits del cuerpo de datos. Esta dirección es almacenada en un registro de la memoria. Finalmente, se eliminan de la trama los ocho bits correspondientes a la dirección virtual y se modifica el subcampo *Subtype* con el valor “0001” y se reenvía la trama, convertida ahora en una trama RA, a la capa MAC para continuar con el proceso de asociación.

Con la dirección asignada, todas las tramas dirigidas al AP se transmitirán con las direcciones de ocho bits. A continuación se describen los procedimientos para la conversión entre los dos esquemas de direccionamiento.

Proceso de conversión de 48 bits a 8 bits

El proceso de conversión de direcciones de 48 bits a 8 bits para las tramas a transmitir se realiza de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 27.

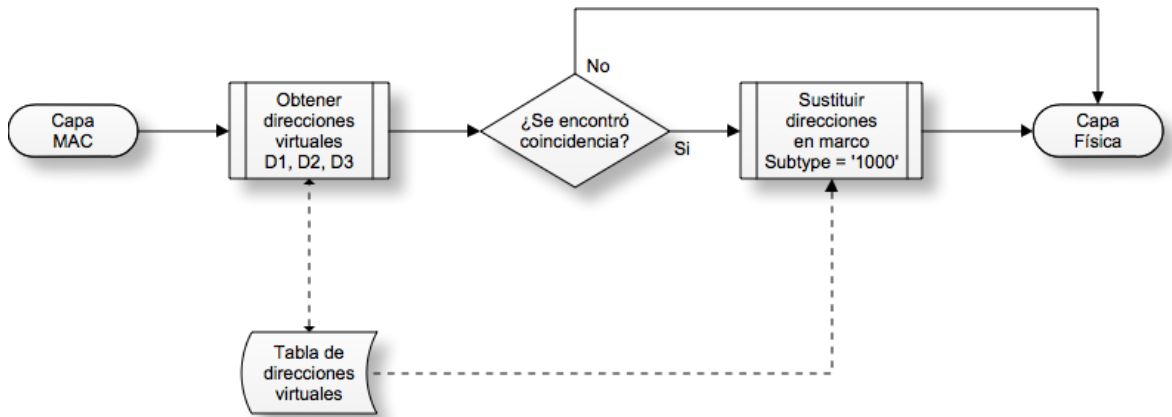


Figura 27. Esquema de conversión de direcciones de 48 bits a 8 bits

Cuando se recibe una trama de la capa MAC, se buscan las direcciones virtuales correspondientes a las direcciones MAC (Dirección 1, Dirección 2 y Dirección 3) incluidas en el encabezado del marco. Si no se encuentra una coincidencia, la trama se envía directamente a la capa física para su transmisión por el canal inalámbrico. Si se encuentran las direcciones virtuales, se sustituyen éstas por las direcciones de 48 bits y se modifica el campo de *Subtype* con el valor "1000". Posteriormente se envía la trama a la capa física para su transmisión.

Proceso de conversión de 8 bits a 48 bits

El proceso de conversión se lleva a cabo de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 28.

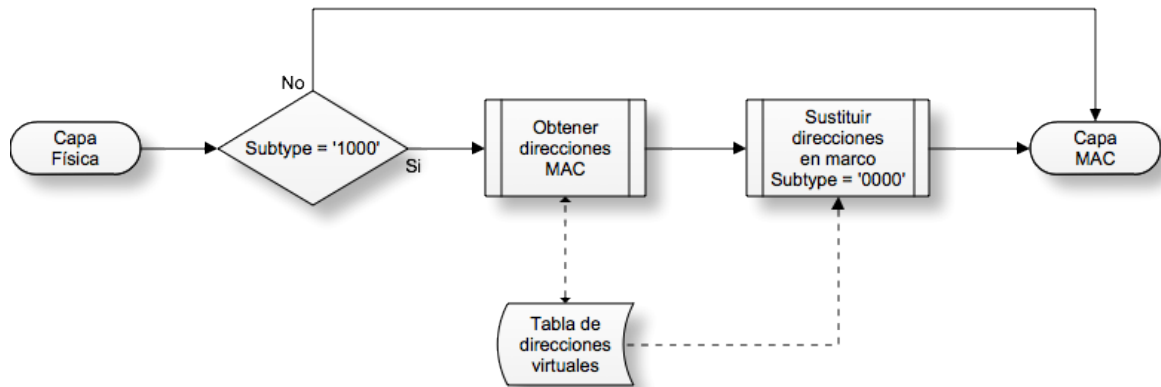


Figura 28. Esquema de conversión de direcciones de 8 bits a 48 bits

Quando se recibe una trama de la capa física se revisa el subcampo *Subtype* para determinar si la trama corresponde a una trama con direcciones virtuales (valor “1000”). En caso de que sea una trama con direcciones de 48 bits, ésta se envía inmediatamente a la capa MAC para su procesamiento correspondiente. Si la trama contiene direcciones virtuales, se buscan las direcciones MAC que correspondan a cada una de las tres direcciones virtuales en la Tabla de Direcciones Virtuales y éstas se sustituyen en la trama recibida. Así mismo, se modifica el valor del campo *Subtype* de “1000” a “0000” para que pueda ser procesado correctamente por la capa MAC.

5.3 Simulación.

La implementación del esquema propuesto se realizó en la versión 14.5 de la herramienta de simulación OPNET. El simulador modela los dispositivos de red de acuerdo al modelo TCP/IP [46] [47] el cual divide en cuatro capas la operación de acceso a la red: capa de aplicación, capa de transporte, capa de red y capa de enlace de datos. El simulador OPNET cuenta con un modelo de WLAN que incluyen las principales funciones de IP y de la capa MAC (Figura 29). En esa figura se pueden observar los procesos que forman parte del modelo mostrados por cuadros grises y su relación a las capas del modelo TCP/IP.

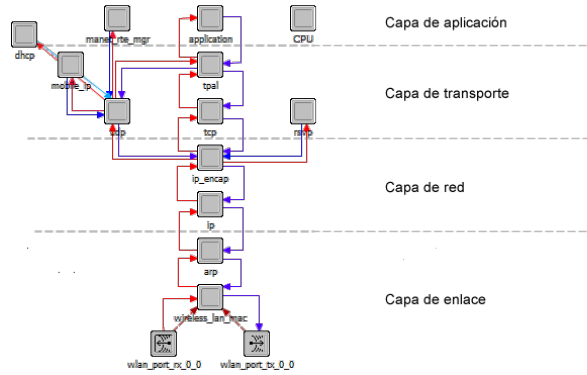


Figura 29. Modelo WLAN de un dispositivo con acceso a la red

La compresión de los encabezados de paquetes de VoIP se lleva a cabo en dos fases. En la primera fase se comprimen los encabezados de los protocolos RTP, UDP e IP en el *proceso ip* de la capa de red de OPNET una vez que todos los campos del encabezado IP han sido completados. La segunda fase del proceso de compresión se lleva a cabo en el *proceso wireless_lan_mac* de la capa de enlace del modelo de OPNET. después de que los encabezados de la capa MAC han sido completados, es decir, antes de que los paquetes sean puestos en la cola de transmisión.

5.3.1 Implementación del mecanismo de compresión RTP/UDP/IP

La compresión y descompresión del encabezado se implementó dentro del subproceso *ip_rte_central_cpu* del proceso *IP* del modelo *wlan* de OPNET.

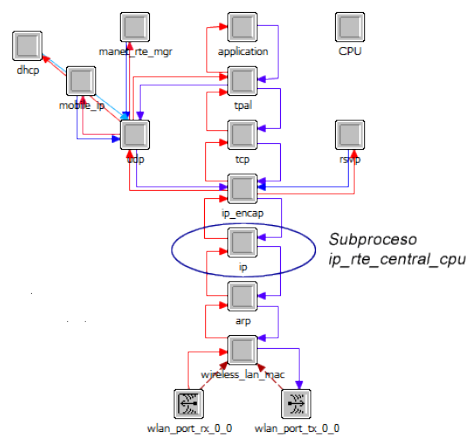


Figura 30. Proceso en donde se realiza la compresión del encabezado RTP/UDP/IP

La operación del mecanismo se hace a través de las funciones *comp_RUI()* y *descomp_RUI()* las cuales realizan las funciones de comprimir y descomprimir los encabezados respectivamente.

Comp_RUI(). Se ejecuta en el nodo que origina la transmisión de los paquetes. Sus dos funciones principales son: 1) solicitar el establecimiento de un contexto cuando se inicial la transmisión de un nuevo flujo de VoIP y 2), comprimir los encabezados de los paquetes que pertenecen al flujo de VoIP. La función es llamada desde la función *ip_rte_packet_send()* una vez que los paquetes que se van a transmitir han sido procesados por los algoritmos de enrutamiento.

Descomp_RUI(). Se ejecuta en el nodo destino y es llamada desde la función *ip_rte_packet_arrival()*. Su función es capturar los paquetes con encabezados comprimidos y reconstruirlos utilizando la información de los contextos almacenados. Una vez que el encabezado es reconstruido, el paquete es enviado a su flujo normal dentro de la función *ip_rte_packet_arrival()* para que pueda ser procesado por las funciones de enrutamiento. Adicionalmente, la función se encarga de asignar el identificador del contexto cuando se solicita el establecimiento de un contexto nuevo.

5.3.2 Implementación del mecanismo de compresión de la capa MAC

El procedimiento de la asignación y conversión de direcciones virtuales se realiza en el proceso *wireless_lan_mac* (ver Figura 31) en donde se ejecutan todas las funciones relacionadas con la operación de la capa de enlace.

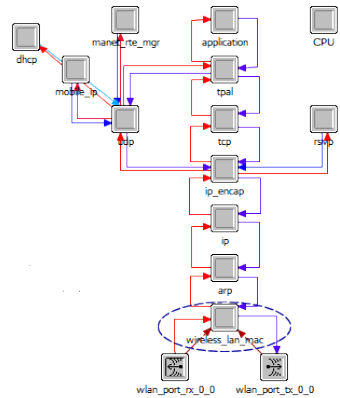


Figura 31. Proceso en donde se realiza el direccionamiento virtual

La implementación del mecanismo de compresión se hizo a través de tres funciones:

1. *SendsADV()*: Envía la trama para solicitar la asignación de la dirección virtual (SADV). La trama SADV tiene las funciones de solicitar la asociación del dispositivo al BSS del AP y solicitar la asignación de la dirección virtual por parte del mecanismo de compresión. Sin embargo, OPNET no modela el proceso de asociación de clientes a los AP de acuerdo a la especificación 802.11. La asociación se hace de manera automática durante el estado de inicialización del BSS (BSS_INIT) de cada cliente. Para simular el proceso de solicitud de asignación, se agregó el estado SADV al diagrama de estados que modela al proceso *wireless_lan_mac*.

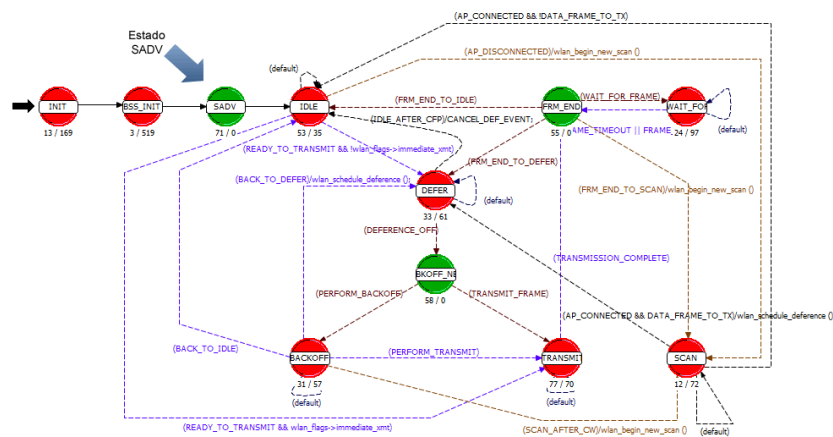


Figura 32. Diagrama de estados del proceso *wireless_lan_mac*

Este estado se ejecuta una vez que termina el estado de configuración del BSS (BSS_INIT). El código de este estado se encarga de llamar a la función *SendSADV()* que crea y envía la trama de SAVD al AP para solicitar la asignación de una dirección virtual. La función de solicitar la asociación es ignorada en esta implementación del mecanismo. Al recibir la trama SAVD, el AP asigna la dirección virtual y no reenvía la trama a la capa MAC, debido a que el cliente ya ha sido asociado al AP. En su lugar, crea la trama RADV y la envía al cliente para que registre su dirección virtual asignada.

2. *ConvMac2DV()*. Esta función convierte las direcciones MAC de 48 bits a su dirección virtual equivalente. Se ejecuta dentro de la función *wlan_prepare_frame_to_send()* cuando se recibe un paquete de VoIP desde la capa IP. Cuando la función *wlan_prepare_frame_to_send()* ha creado y llenado el encabezado de la trama MAC que encapsulará al paquete de VOIP nuestra función procesa el encabezado recién creado substituyendo las direcciones MAC por las direcciones virtuales. Así mismo, modifica el subtipo de la trama para indicar que la trama tiene el encabezado comprimido (*Subtype* = "1000"). Si no se encuentran direcciones virtuales que correspondan a las direcciones MAC, el encabezado no se modifica y se transmite de forma normal.

3. *ConvDV2Mac()*. Esta función convierte las direcciones virtuales de las tramas recibidas de la capa física a sus direcciones MAC correspondientes. Se ejecuta dentro de la función *wlan_physical_layer_data_arrival()* y procesa las tramas recibidas después de que se verifica que ha sido recibida correctamente, y antes de que se haga la verificación de que la trama está dirigida al dispositivo. Si la trama recibida es una trama con encabezado comprimido (*Type* = "10" y *Subtype* = "1000"), se procesan las direcciones virtuales y se modifica el subtipo de la trama (Subtipo = "0000") para que sea procesada correctamente por el resto de las funciones de la capa MAC.

5.3.3 Arquitectura de la red

La arquitectura de la red está formada por tres subredes:

- 1) Una troncal inalámbrica con una topología lineal que incluye cuatro nodos inalámbricos. En una topología lineal los nodos de los extremos solo pueden detectar su nodo vecino inmediato mientras que los intermedios pueden ver dos nodos vecinos inmediatos. La separación y la potencia entre los nodos debe ser tal que no puedan detectar los nodos vecinos de su vecino inmediato. La comunicación entre los extremos debe pasar por todos los enrutadores intermedios (ver Figura 33).

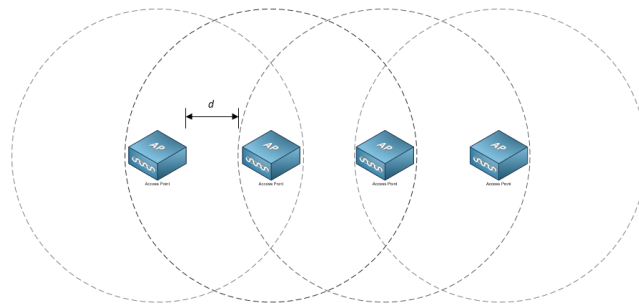


Figura 33. Topología lineal

- 2) Una red local inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés) con topología en estrella, es decir, en modo infraestructura de acuerdo a la especificación IEEE 802.11. La WLAN se conecta en uno de los extremos de la dorsal inalámbrica.
- 3) Una red tipo Ethernet (red fija) con topología en estrella, la cual se conecta en el otro extremo de la dorsal inalámbrica.

Dorsal inalámbrica

Los nodos de la dorsal están formados por enrutadores inalámbricos. Uno de los extremos cuenta con dos interfaces inalámbricas: una con tecnología 802.11a para comunicarse con los nodos de la dorsal inalámbrica, y otra interfaz con tecnología 802.11g, que funciona como un AP para dar servicio a las terminales inalámbricas.

El otro extremo cuenta con dos interfaces: una interfaz inalámbrica 802.11a para comunicarse con los nodos de la dorsal, y una interfaz Ethernet para conectarse a una red fija.

La distancia entre todos los nodos enrutadores de la red dorsal es de 300 metros para evitar que un nodo pueda detectar otro nodo que no sea un vecino inmediato. Las Tabla 9 y Tabla 10 muestran las configuraciones utilizadas para los enrutadores.

Tabla 9. Configuración de los enrutadores 1, 2 y 3

Modelo OPNET (enrutadores 1,2 y 3)	Wlan2_router_adv
Interfaz	802.11a
Canal	1
Tasa de transmisión	36 Mbps
Potencia	20 mW
Potencia de recepción	-80 dbm
Protocolo de enrutamiento IP	RIP
Función de AP	Deshabilitado
Direcciones IP	
Enrutador 1	192.0.1.1
Enrutador 2	192.0.1.2
Enrutador 3	192.0.1.3
Interfaz (WLAN) (Enrutador 1)	802.11g
Tasa de transmisión	54 Mbps
Canal	2
Función de AP	Habilitados
Protocolo de enrutamiento	RIP
Dirección IP	192.0.7.0

Tabla 10. Configuración del enrutador 4

Modelo OPNET (enrutador 4)	Wlan_ethernet_router_adv
Interfaz dorsal	802.11a
Canal	1
Tasa de transmisión	36 Mbps
Potencia	20 mW
Potencia de recepción	-80 dbm
Protocolo de enrutamiento IP	RIP
Función de AP	Deshabilitado
Dirección IP	192.0.1.4
Interfaz Ethernet	
Tasa de transmisión	100 Mbps
Dirección IP	192.0.6.0
Configuración de la interfaz WLAN en el escenario 1	
Interfaz WLAN	802.11g
Tasa de transmisión	54 Mbps
Canal	2
Función de AP	Habilitado
Protocolo de enrutamiento	RIP
Dirección IP	192.0.7.0

WLAN

Esta formada por hasta 25 terminales inalámbricas con tecnología 802.11g en las cuales se originan las llamadas de VoIP. Están configuradas en el modo de infraestructura, por lo cual necesitan conectarse a través del AP que forma parte de la dorsal inalámbrica. La Tabla 11 muestra la configuración utilizada para las terminales que forman parte de la WLAN. Todos los demás parámetros del OPNET se dejaron los que se presentan por omisión.

Tabla 11. Configuración de las terminales inalámbricas de la WLAN

Modelo OPNET	Wlan_wkst_edu
Interface (WLAN)	802.11g
Tasa de transmisión	54 Mbps
Canal	2
Función de AP	Deshabilitado
Protocolo de enrutamiento	RIP
Direcciones IP	192.0.7.1 a 192.0.7.25

Red tipo Ethernet

Está formada por hasta 25 terminales Ethernet en donde se reciben las llamadas VoIP originadas en la WLAN. Las terminales se conectan a la dorsal por medio de un conmutador (*switch*). En la Tabla 12 se muestran la configuración que se utilizó para las terminales Ethernet. Los demás parámetros que no se muestran, se mantuvieron con los que ofrece OPNET por omisión.

Tabla 12. Configuración de las terminales Ethernet

Modelo OPNET	Ethernet_wkstn_adv
Protocolo de enrutamiento	RIP
Direcciones IP	192.0.6.1 a 192.0.6.25

Finalmente, en la Figura 34 muestra la arquitectura completa de la red simulada.

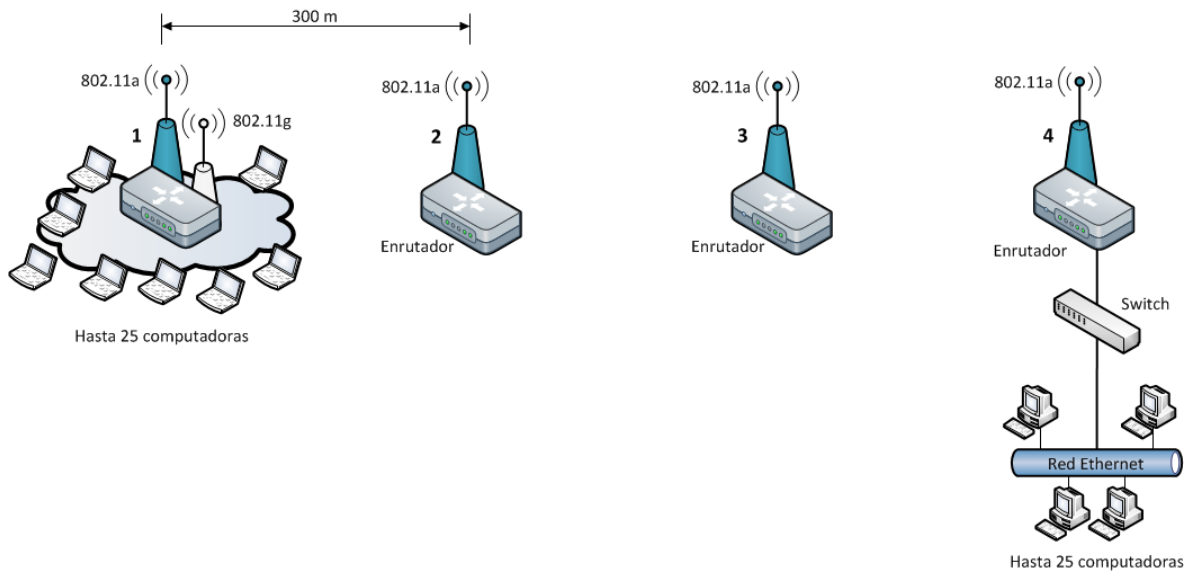


Figura 34. Arquitectura de la red simulada

5.3.4 Fuente de tráfico de voz

Para simular el tráfico de VoIP se utilizó la aplicación predefinida que OPNET proporciona, la cual se encarga de modelar el tráfico de VoIP de acuerdo a las características del códec seleccionado. Para este trabajo se utilizó un códec G.729^a, el cual es muy popular para aplicaciones de VoIP debido a sus bajos requerimientos de ancho de banda (8kbps) y procesamiento computacional. Utiliza una frecuencia de muestreo de 8 kHz y produce tramas de 10 bytes cada 10 ms. Tiene una tasa de transmisión constante de 8Kbps. El códec tiene la funcionalidad de poder enviar más de una trama por paquete, por lo que, para disminuir la carga en la red, se utilizaron dos tramas de voz por paquete. La Tabla 13 muestra la configuración que se utilizó para modelar las llamadas de VoIP.

Tabla 13. Configuración de la fuente de tráfico de voz

Modelo OPNET	Application Config
Codificador	G.729a
Tramas de voz por paquete	2
Modo de operación	Simultáneo
Tiempo de inicio	Distribución normal con media en 20 s
Duración	Distribución uniforme entre 45 y 90 s

5.3.5 Escenarios

Se contemplaron cuatro escenarios en los que se modificaron el número de nodos de la red dorsal. Así mismo, en cada escenario se realizaron cinco simulaciones variando en el número de llamadas de VoIP en múltiplos de cinco: 5, 10, 15, 20 y 25 llamadas.

Escenario 1: Red de un salto. Se consideró un nodo enrutador en la red dorsal (nodo 1). El enrutador se configuró con una interface 802.11g y una Ethernet para la conexión a la red fija (ver Figura 35).

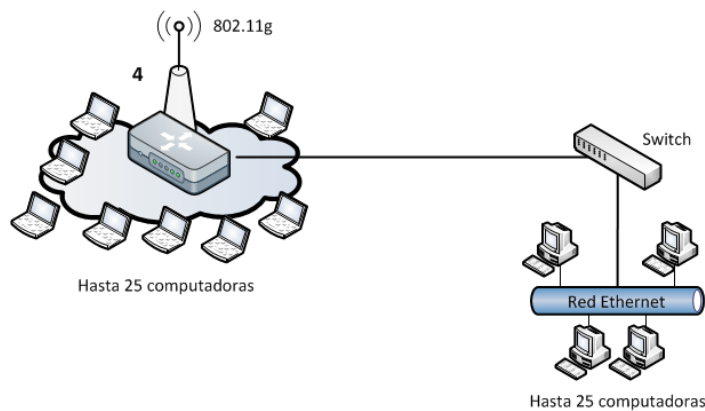


Figura 35. Escenario 1: Un salto

Escenario 2: Red de dos saltos. Se consideraron dos nodos enrutadores en la red dorsal (nodos 1 y 4). Todos los flujos de VoIP deben pasar por ambos enrutadores. Todas las estaciones de la red WLAN se conectan a la red por medio del enrutador 1 (ver Figura 36).

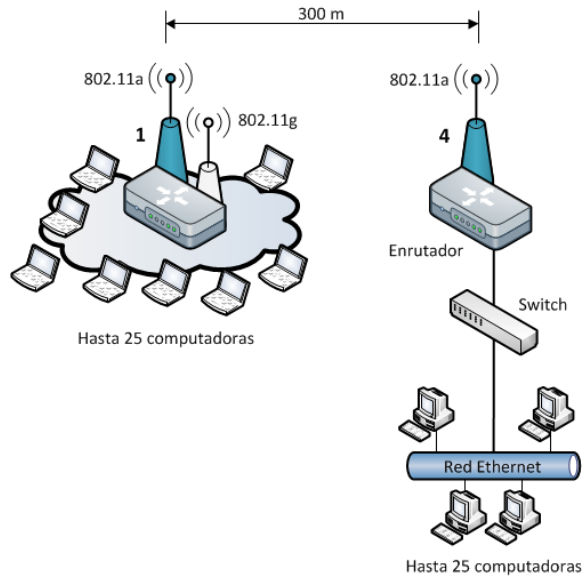


Figura 36. Escenario 2: Dos saltos

Escenario 3: Red de tres saltos. Se consideraron tres nodos enrutadores en la red dorsal (nodos 1, 2 y 4). Los paquetes de VoIP deben pasar por los tres enrutadores (ver Figura 37).

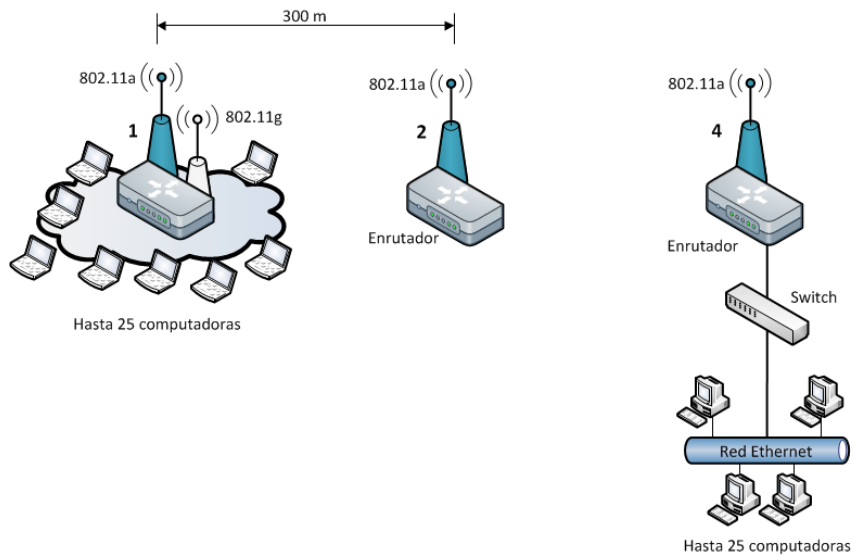


Figura 37. Escenario 3: Red de tres saltos

Escenario 4: Red de cuatro saltos: Se consideraron cuatro nodos enrutadores en la red dorsal (nodos 1, 2, 3 y 4). Todos los paquetes de VoIP deben pasar por los cuatro enrutadores (ver Figura 38).

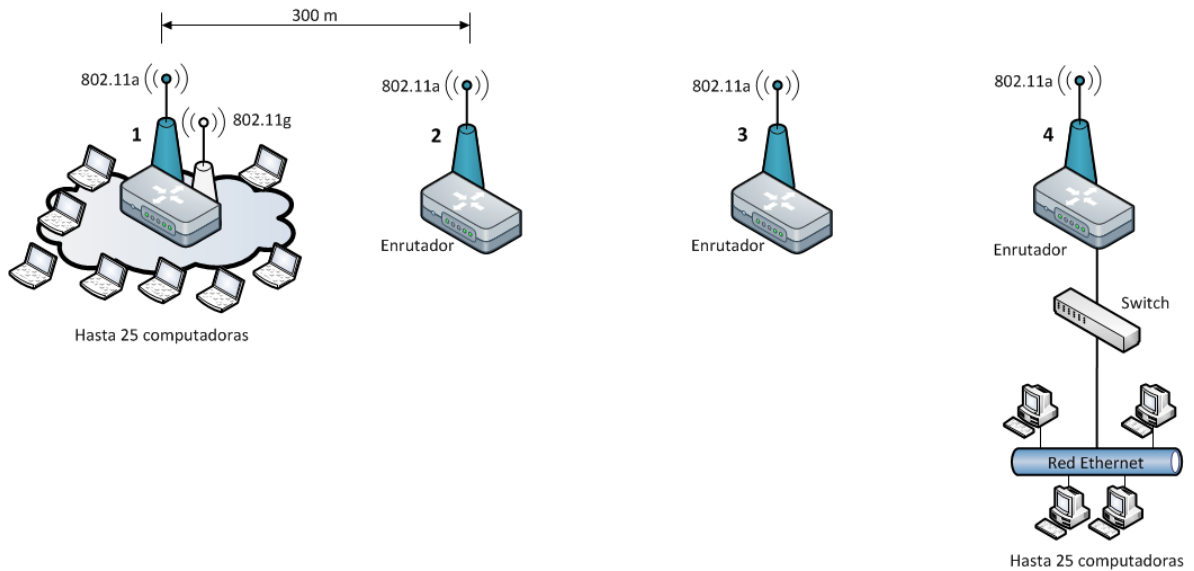


Figura 38. Escenario 4: Red de cuatro saltos

Cada uno de los escenarios anteriores se simuló incrementando el número de flujos de VoIP desde 5 hasta 25 en incrementos de cinco, por lo que se realizaron 20 simulaciones en total. Cada una de las simulaciones se ejecutó cinco veces para compensar las variaciones en los resultados debido a las distribuciones de probabilidad del tiempo de inicio y duración de los flujos de VoIP.

6 Resultados

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron a través de la simulación de la implementación del mecanismo de compresión en la capa IP y en la capa MAC. La medición del desempeño del mecanismo propuesto se hizo a través de la medición de métricas de parámetros de calidad:

- Tasa de pérdida de paquetes (PLR, por sus siglas en inglés)
- Retardo extremo a extremo y en la capa MAC
- Variación del retardo
- Jitter
- Tráfico de la capa MAC

Para validar si el desempeño del mecanismo propuesto mejora la calidad de las llamadas de VoIP, se realizaron comparaciones de los parámetros medidos con un modelo de referencia que no implementa el mecanismo de compresión.

6.1 Tasa de pérdida de paquetes de voz

Es un parámetro que refleja el porcentaje de paquetes que son transmitidos por un nodo origen i destinados a un nodo destino j y que por alguna circunstancia no llegan a su destino. Se mide tomando en cuenta la cantidad de paquetes que un nodo “origen” envía a un nodo destino y los paquetes que el nodo “destino” realmente recibe en un segundo como muestra en la Ecuación 2.

$$PLT = \frac{\sum_{i,j=1}^n (1 - \frac{Pkt(Rx)_i}{Pkt(Tx)_j})}{n} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde

- n es el número de nodos activos
- $Pkt(Tx)_j$ son los paquetes transmitidos por el nodo j al nodo i en un segundo;
- $Pkt(Rx)_i$ son los paquetes recibidos por el nodo i transmitidos del nodo j en un segundo.

Los principales factores que contribuyen a la pérdida de paquetes en una red IP son el almacenamiento temporal en las colas de transmisión de las capas IP y MAC así como por colisiones en el canal inalámbrico.

La pérdida en las colas se da cuando la tasa de servicio de los calendarizadores es menor a la tasa de llegada de paquetes. Es decir, llegan más paquetes de los que se pueden procesar y retransmitir a las capas inferiores o al canal inalámbrico. Cuando se presenta esta situación, los calendarizadores cuentan con una memoria temporal o *buffer*, en donde se almacenan aquellos paquetes que tienen que esperar su turno para ser retransmitidos. Por lo general, la capacidad de los buffers es limitada, por lo que cuando se llenan, los paquetes que llegan posteriormente son eliminados. Los protocolos de las capas superiores son los responsables de detectar que se han descartados paquetes, y retransmitirlos otra vez. En el caso de los paquetes de VoIP, los paquetes que son descartados no son retransmitidos.

La otra fuente de pérdida de paquetes es la colisión en el medio inalámbrico. Las colisiones ocurren cuando dos o más estaciones transmiten al mismo tiempo. El

protocolo de la capa MAC cuenta con un mecanismo para tratar de retransmitir los paquetes colisionados, sin embargo, las tramas son descartadas cuando se alcanza el número máximo de retransmisiones.

La pérdida de paquetes dentro de las redes de conmutación de paquetes es algo que no se puede evitar. Las aplicaciones de VoIP pueden tolerar hasta 1% de pérdida de paquetes por segundo [48] sin que sea percibida por el usuario. No obstante, muchos codificadores han implementado técnicas para compensar los efectos de la pérdida de paquetes en la percepción del usuario. De acuerdo a [49], las técnicas para compensar la pérdida de paquetes permite llegar hasta una PLR de 5% sin que la conversación deje de ser inteligible.

En la Figura 39 se muestran los resultados correspondientes a los escenarios con un salto (Figura 39a), dos saltos (Figura 39b), tres saltos (Figura 39c) y cuatro saltos (Figura 39d). La gráficas relacionan el número de llamadas de VoIP simultáneas (eje horizontal) contra el porcentaje de paquetes descartados por segundo (eje vertical). En las gráficas se incluyen la tasa de descarte del modelo de referencia (sin compresión) representado por una línea negra (■) y la tasa de descarte del modelo que implementa el mecanismo de compresión representado por la línea roja (▲).

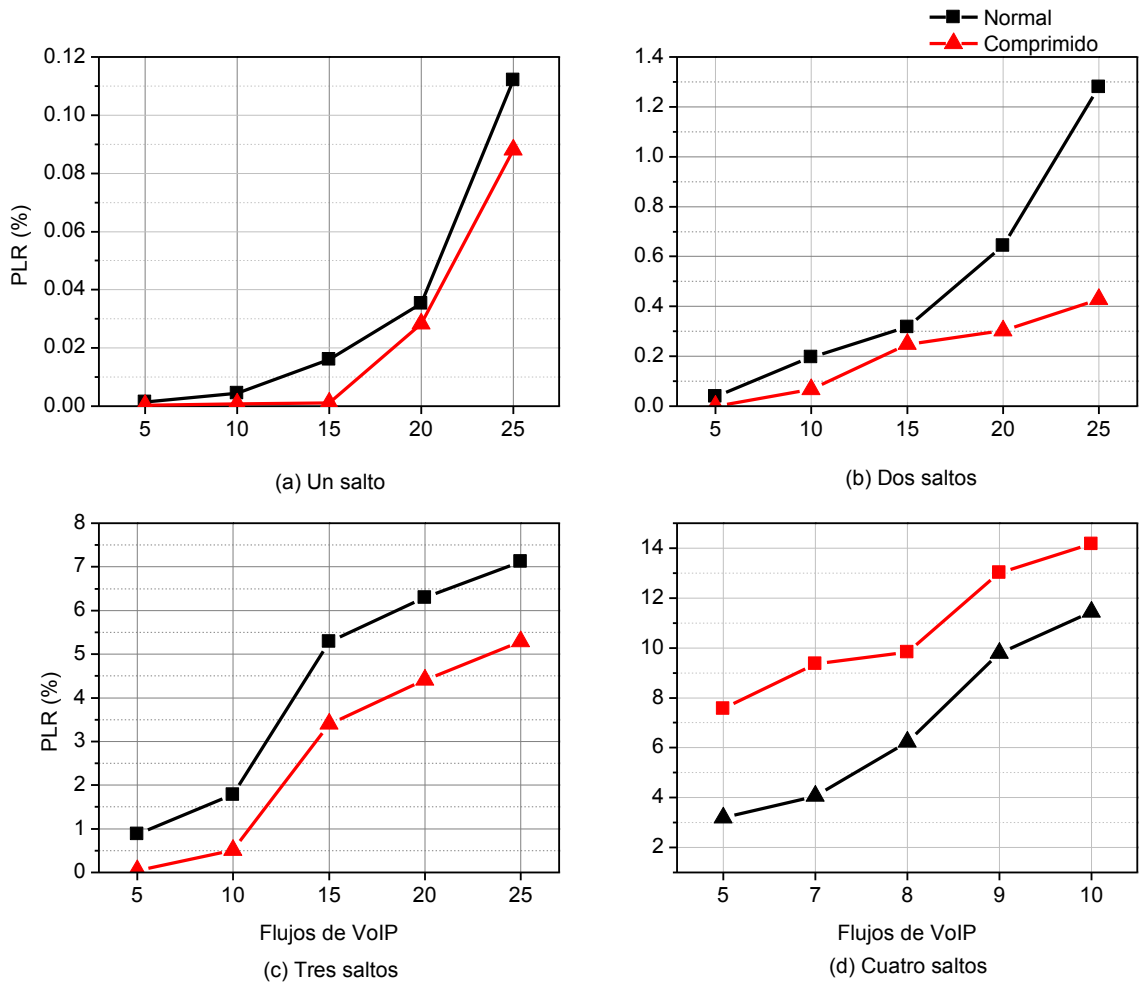


Figura 39. Pérdida de paquetes de VoIP. a) Un salto; b) Dos saltos; c) Tres saltos y d) Cuatro saltos

Los resultados obtenidos con un salto muestran que la respuesta de la red en ambos modelos fue prácticamente la misma. La PLR obtenida por ambos modelos fue menor al 0.2%, lo que significa que los codificadores podrán decodificar los paquetes de voz con alta calidad. Aunque el mecanismo de compresión presentó una ligera mejoría con respecto al modelo sin compresión, las diferencias en la PLR entre ambos modelos no se traduciría en una diferencia en la percepción de calidad por parte del usuario debido a la baja PLR obtenida por ambos modelos. No obstante lo anterior, la PLR del mecanismo de compresión fue menor en un 70% que la PLR del modelo sin

compresión para 5, 10 y 15 flujos. Con 20 y 25 flujos, la diferencia entre ambos modelos se redujo 20 y 30% respectivamente.

En el escenario con dos saltos, la diferencia en la PLR entre ambos modelos se hace más evidente. Con 5, 10 y 15 flujos, la PLR de los dos modelos se mantiene por debajo de 0.3% con muy poca diferencia. Sin embargo, con 20 flujos, la PLR del modelo sin compresión se duplicó al pasar de 0.3% a 0.6% mientras que la PLR del modelo con compresión se incrementó un 21% al pasar de 0.25% a 0.30%, es decir, la PLR del modelo sin compresión fue el doble que del modelo con compresión. Con 25 flujos, la PLR sin compresión se duplicó al pasar de 0.64% a 1.28% mientras que la PLR del modelo con compresión tuvo un incremento del 41% al pasar de 0.3% a 0.42%, es decir, la PLR sin compresión fue un 300% mayor que sin compresión. En este último caso, es importante observar que el modelo sin compresión rebasó el valor recomendado del 1% de PLR.

Con tres saltos, la PLR se incrementa se incrementa rápidamente por arriba del 1% en ambos modelos, sin embargo, mientras que el modelo sin compresión obtiene una PLR de 1.7% con 10 flujos, el modelo con compresión obtuvo 0.5% lo que permite obtener un mayor número de llamadas con una mejor calidad que el modelo sin compresión. Con 15, 20 y 25 flujos, el mecanismo de compresión permite obtener un 30% de mejora manteniendo hasta 20 flujos con un PLR menor al 5%, en contraste con el modelo sin compresión en donde con 15 flujos rebaso el 15% de PLR.

En el escenario con cuatro saltos, el modelo sin compresión obtiene una PLR mínima de 7.7% con 5 flujos y se incrementó hasta el 14% con 10 flujos. El modelo con el mecanismo de compresión obtuvo mejores resultados y logró obtener 7 flujos con una PLR menor al 5%. Aunque con 8, 9 y 10 flujos el mecanismo de compresión obtuvo una PLR mayor al 5%, ésta fue menor en todos los casos con la PLR obtenida sin el compresión.

6.2 Retardo extremo a extremo

El retardo mide el tiempo que tardan los paquetes de ir desde el origen hasta el destino. En aplicaciones de VoIP el retardo puede afectar considerablemente la

calidad de las conversaciones ya que los paquetes de voz se van reproduciendo a manera que se van recibiendo. Los codec de voz esperan recibir los paquetes de voz con un cierto retardo de tal manera que su reproducción suene natural para el receptor. Cuando los paquetes no llegan dentro de la tolerancia permitida, estos paquetes son descartados y no son reproducidos. El efecto que percibe el usuario es una reproducción entrecortada, llegando al punto de ser ininteligible. Para que una conversación se pueda mantener de manera fluida, la ITU recomienda que el retardo del origen al destino se mantenga menor a los 200ms [50].

El efecto del retardo se puede observar fácilmente en las comunicaciones por satélite, ya que resulta difícil mantener una conversación de forma fluida. El retardo en ambos sentidos (ida y vuelta) es entre 250 y 280ms. Este tiempo solo incluye el segmento satelital, por lo que habría que agregar los retardos por otro tipo de redes de las que se haga uso.

En un servicio VoIP sobre una WLAN, los principales factores que contribuyen al retardo son:

- Compresión/descompresión del codec
- Almacenamiento en las colas IP para el enrutamiento
- Mecanismo de acceso al medio
- Propagación

De estos factores, el retardo en las colas de los enrutadores, el retardo de la capa MAC y el de propagación se multiplican cuando las redes cuentan con dos o más saltos. Considerando una red con n saltos, el retardo total estaría dado por la Ecuación 3:

$$R = \Delta_{codec} + \sum_{i=1}^n (\Delta_{ip} + \Delta_{mac} + \Delta_{prop})_i + \Delta_{decod} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- R : Es el retardo total
 n : Es el número de saltos intermedios
 Δ_{codec} : Es el retardo de compresión de codec

- Δ_{ip} : Es el retardo de procesamiento en los colas de enrutamiento
- Δ_{mac} : Es el retardo en la capa MAC
- Δ_{prop} : Es el retardo por propagación
- Δ_{decod} : Es el retardo de descompresión del codec

En la Figura 40 se muestran los resultados obtenidos con respecto al retardo extremo a extremo, tomando en cuenta a partir del retardo del codec hasta que el paquete es procesado por el codec en el nodo destino. A partir de la Figura 40a se puede observar que el retardo mínimo que se puede obtener con un solo salto y bajo tráfico es de alrededor 81ms. Es importante señalar que con un salto, la compresión de los encabezados prácticamente no contribuye a la reducción del retardo.

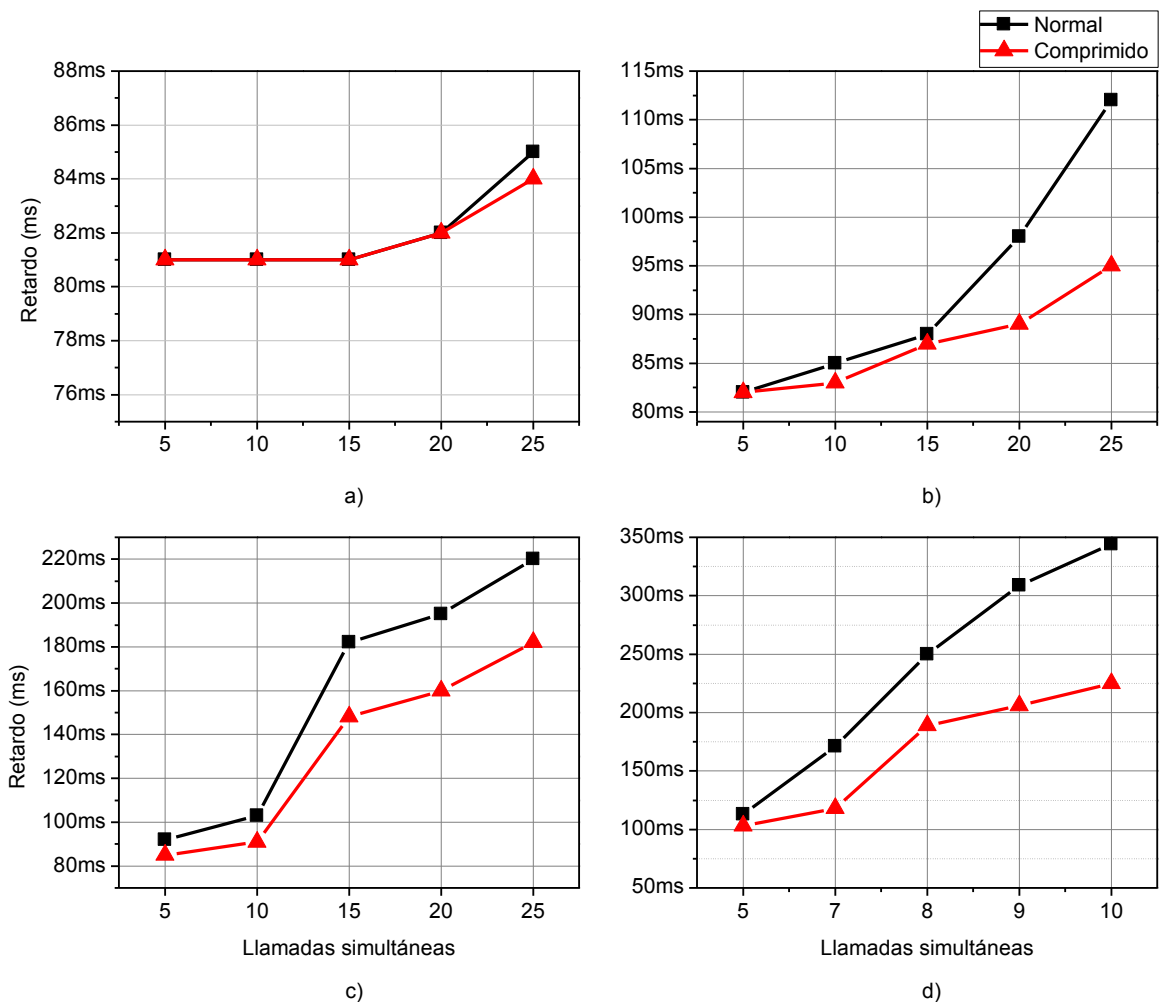


Figura 40. Comportamiento del retardo extremo a extremo comparando el mecanismo de compresión con respecto al modelo sin compresión; a) Un salto; b) dos saltos; c) tres saltos y d) cuatro saltos

Con dos saltos (Figura 40b), la respuesta de ambos modelos es muy similar en condiciones de poco tráfico (hasta 15 flujos), sin embargo, a medida que se incrementa el número de flujos, la respuesta del modelo con compresión permitió mantener el retardo por debajo de 100ms incluso con 25 flujos, mientras que el modelo sin compresión llegó hasta 112ms con 25 flujos. La gráfica muestra que con dos saltos, el efecto de la compresión se empieza hacer evidente a medida que se incrementa el número de flujos, en la cual se obtiene una mejora del 10% en el retardo con 20 flujos y de 17% con 25 flujos.

En el escenario uno y dos, los resultados de la simulación no indican que se obtenga una mejora importante que justifique la aplicación de un esquema de compresión. En ambos casos el retardo promedio se mantuvo por debajo de los 150ms, lo cual es inferior a lo recomendado por la ITU para las comunicaciones telefónicas.

En el escenario con tres saltos los retardos por procesamiento de los tres enrutadores y el aumento en el número de transmisiones provocan un incremento importante en el retardo, principalmente cuando se tienen 15, 20 y 25 flujos. Con 5 y 10 flujos, el modelo sin compresión se mantuvo con un retardo muy cercano a los 100ms, mientras que el modelo con compresión presentó una mejora en el retardo de 8 y 13% respectivamente. Sin embargo, con 15 flujos ambos modelos presentaron un incremento importante en el retardo. El modelo sin compresión aumentó un 76% para llegar a 182ms, y el modelo con compresión aumento 60% para llegar a 148ms, 2ms por debajo del límite recomendado. El incremento en el retardo para 20 y 25 flujos fue similar para ambos modelos, manteniendo el modelo con compresión una mejora de 20% en el retardo.

En el escenario con 4 saltos, el retardo se incrementó rápidamente disminuyendo la cantidad de flujos que se pueden transmitir con un retardo menor a los 300 ms. El retardo sin compresión presentó un crecimiento casi lineal hasta llegar a los 350 ms con 10 flujos, mientras que la compresión lo mantuvo por debajo de los 220 ms con 10 flujos (una mejora del 37%). En el intervalo de los 150 ms, se obtuvieron 7 flujos con compresión mientras que sin compresión solamente 5, es

decir, un crecimiento del 40%. En el límite de lo que se consideró como buena (menor a 200 ms), con compresión se obtuvieron 9 flujos contra los 7 sin compresión (un incremento del 29%).

6.3 Variación del retardo (variancia)

Si bien en la sección anterior se describieron los resultados con respecto al retardo, los valores reportados corresponden a los promedios obtenidos para cada uno de los escenarios, donde algunos paquetes observaron menores retardos al reportado y otros más observaron retardos mayores al promedio. La variancia del retardo es un parámetro importante porque está muy relacionado con la PLR. Si la variancia es grande, esto significa que muchos paquetes serán descartados por códec de VoIP del nodo destino debido a que ya no es posible reproducirlo.

En la Figura 41 se presenta la variancia obtenida en cada uno de los escenarios. En los escenarios uno y dos (Figura 41a y Figura 41b) la variancia del retardo es prácticamente la misma para ambos modelos y es menor a 5ms, lo cual, no afecta la reproducción de los paquetes recibidos.

En el escenario tres se puede observar que la variancia se incrementó considerablemente en el modelo sin compresión. Con cinco llamadas la variancia fue de 18ms y se incremento prácticamente en forma lineal hasta llegar a un poco más de 200ms con 25 llamadas. El modelo con el mecanismo de compresión, tuvo un comportamiento más estable al mantenerse la variancia por debajo de los 30ms en todos los casos.

En el escenario cuatro la variancia del retardo se mantuvo estable por debajo de los 50ms en el modelo con compresión, mientras que en el modelo de referencia, la varianza llegó por encima de los 1000ms.

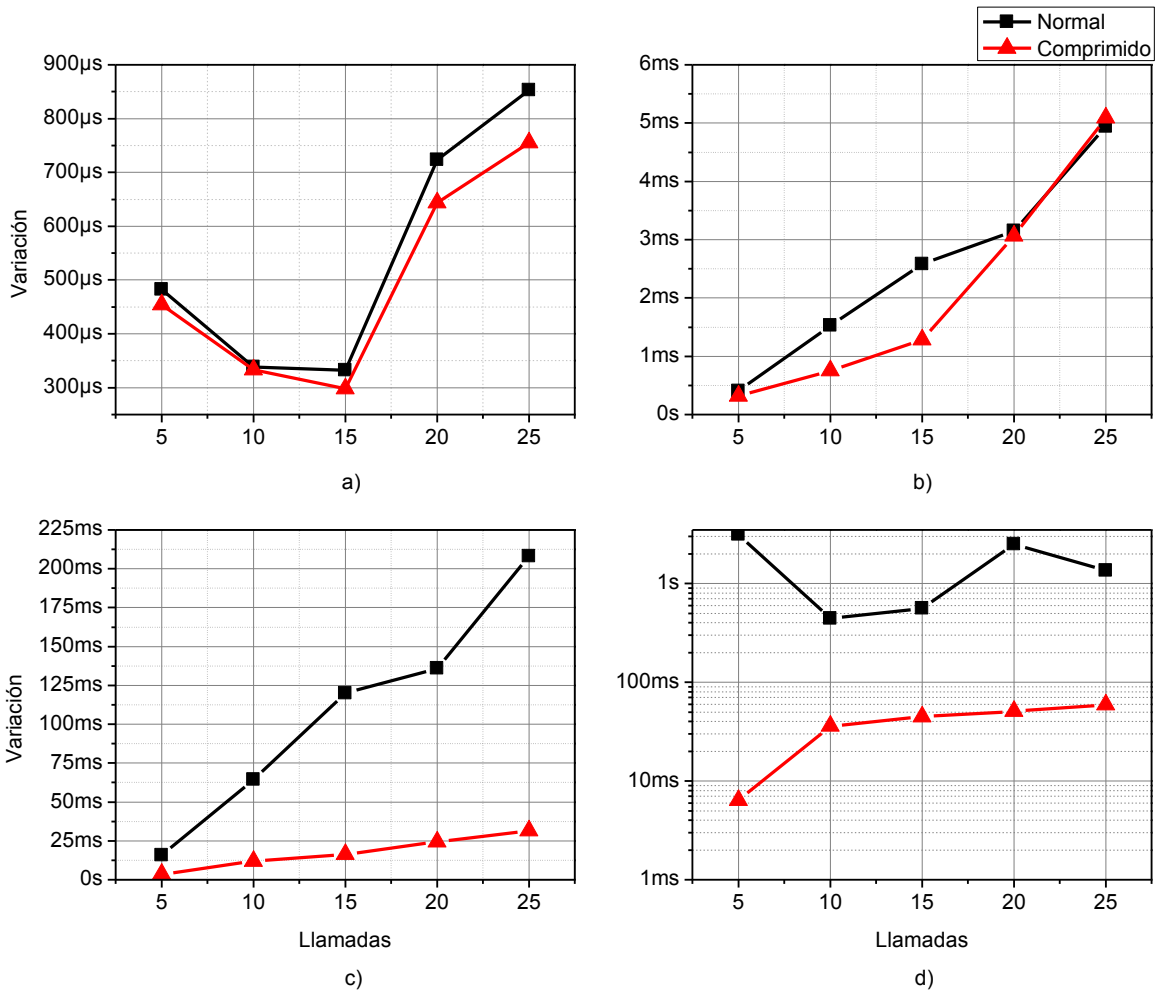


Figura 41. Variación del retardo extremo a extremo. Comparación del mecanismo de compresión con respecto al modelo sin compresión; a) escenario con un salto; b) escenario con dos saltos; c) escenario con tres saltos y d) escenario con cuatro saltos

6.3.1 Jitter

El jitter mide la variación en el tiempo de interarribo de paquetes de VoIP en el nodo destino. Los códec de VoIP envían paquetes a intervalos constantes de tiempo, por ejemplo, el códec G.729a los envía cada 10ms. Debido a los retardos que pueden sufrir los paquetes al atravesar una red inalámbrica, los paquetes pueden atrasarse y no llegar con el mismo intervalo con el que fueron enviados (ver la Figura 42). Esto puede ocasionar problemas al momento de reproducir los paquetes de VoIP que se reciben. El codec en el nodo destino espera que los paquetes lleguen con tiempos de

interarribos constantes. Si estas variaciones son muy grandes, el paquete ya no será reproducido y se descartará.

$$t1 \neq t2 \neq t3$$

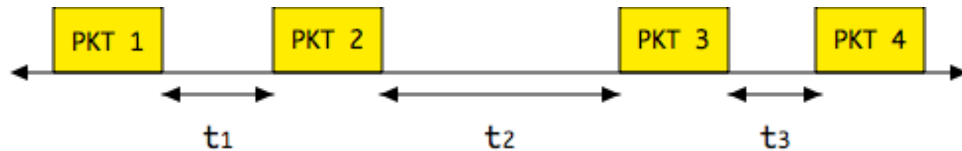


Figura 42. Variación en los tiempos de interarribo de paquetes de VoIP.

Aunque el jitter en las redes de conmutación de paquetes no se puede eliminar, se debe mantener lo más reducido posible. En [51] y [52] se recomienda que los valores del jitter se mantengan entre 30 y 50 ms. Para amortiguar estas variaciones, las aplicaciones de VoIP implementan el uso de buffers de jitter que almacenan temporalmente los paquetes recibidos y los reenvían a intervalos constantes de tiempo.

Los resultados del jitter para los modelos con y sin compresión se muestran en la Figura 43 para los cuatro escenarios. Es importante resaltar que el jitter en el modelo de referencia se mantuvo, en la mayoría de los casos, por debajo del valor recomendado, con la excepción del escenario cuatro, en donde con ocho llamadas, el jitter rebasó los 45ms. Con esta excepción, el jitter en el modelo de referencia no impacta negativamente la calidad de las llamadas.

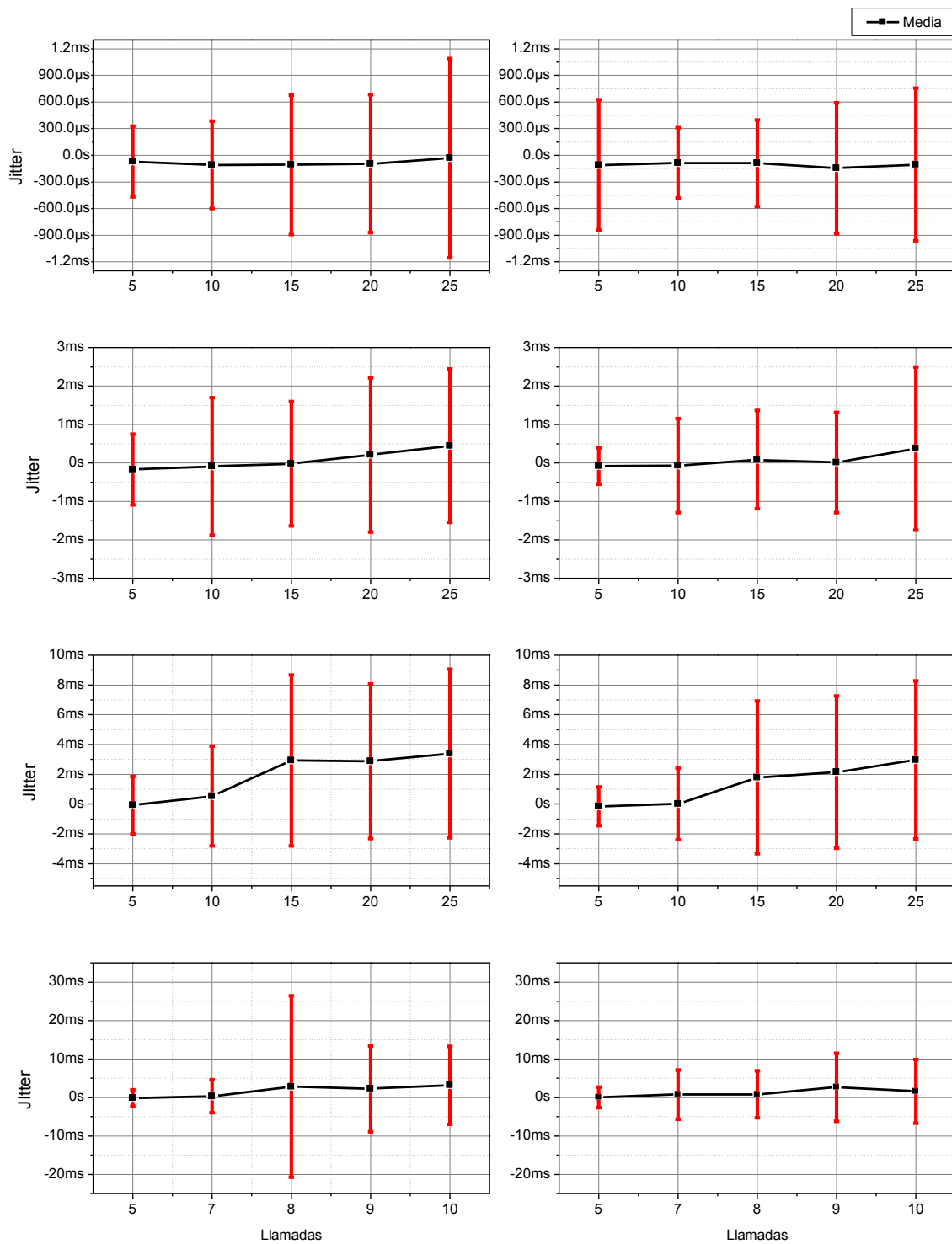


Figura 43. Comportamiento del jitter

Por lo que respecta al modelo con compresión, la reducción en el tamaño de las tramas no representó un impacto significativo en el jitter. El valor de la media del jitter fue prácticamente la misma para ambos modelos en los cuatro escenarios. En donde se pueden apreciar ligeras diferencias es en la desviación estándar representada por las barras de error en la figura. En los escenarios 1, 2 y 3 (Figura 43a, b y c) el modelo con compresión mostró una desviación estándar ligeramente menor que el modelo de referencia. En el escenario cuatro (Figura 43d), el jitter se mantuvo relativamente constante al incrementar el número de llamadas, a diferencia del modelo de referencia, donde la desviación estándar presentó variaciones importantes al incrementar el número de llamadas.

6.4 Retardo en la capa MAC

El retardo en la capa MAC se presenta por la competencia de los dispositivos inalámbricos por utilizar el canal. Debido a que los equipos utilizan radios *half dúplex*, no tienen forma de detectar las colisiones. Por este motivo utilizan un mecanismo para evitar las colisiones, el cual consiste en escuchar el canal inalámbrico para determinar si está disponible. En caso de que esté libre, se espera un intervalo de tiempo y vuelve a escuchar el canal. Si el canal sigue libre, inicia la transmisión. Si después de un determinado tiempo no recibe la confirmación por parte del nodo destino de que el paquete llegó correctamente, se activa un mecanismo de retransmisión, el cual se espera un intervalo de tiempo aleatorio para volver a censar el canal. Si el canal sigue ocupado, se vuelve a esperar por un intervalo de tiempo más grande antes de intentar volver a transmitir.

Debido al algoritmo de retransmisión, el retardo en la capa MAC puede incrementarse considerablemente.

En las redes con multisaltos, como en el caso de los escenarios dos, tres y cuatro, el retardo de la capa MAC puede llegar a ser significativo, sobre todo cuando se presentan colisiones. El retardo en la capa MAC se puede calcular utilizando la Ecuación 4:

$$\Delta_{mac} = T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK} + T_{DIFS} + T_{BO} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

T_{DATA} :	Es el tiempo necesario para transmitir una trama de longitud L bits.
T_{SIFS} :	Es el tiempo de intertrama corto.
T_{ACK} :	Es el tiempo para completar el ciclo de una confirmación de trama recibida.
T_{DIFS} :	Es el tiempo de intertrama DCF.
T_{BO} :	Tiempo del <i>backoff</i> exponencial.

En el trabajo de [53], se presentan expresiones que permiten obtener el retardo de una red 802.11g en función de la longitud de la trama (considerando una red en donde no se presentan colisiones). Por ejemplo, para una tasa de transmisión de 54 Mbps, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$\Delta_{mac}(54Mbps) = 0.1481x + 162.4259 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

x: Es la longitud de la trama

La ecuación anterior indica que para tamaños de paquetes pequeños, el retardo es reducido. De acuerdo a lo anterior, y considerando un escenario donde no se presentan colisiones, el mecanismo de compresión no implica reducciones importantes en el retardo en la capa MAC.

La Figura 44 muestra los resultados relativos al retardo en la capa MAC. En el primer escenario (ver Figura 44a) el retardo en ambos modelos es muy similar y no se aprecia una ganancia importante al reducir el tamaño de las tramas. En el escenario dos (ver Figura 44b) se puede observar que con 20 y 25 llamadas simultáneas, el modelo sin compresión incrementa considerablemente el retardo, lo que indica que el número de retransmisiones fue muy alto. Sin embargo, en el modelo con compresión, el retardo se mantuvo con un ligero incremento del retardo de poco menos de 500us con 25 llamadas.

En el escenario cuatro (ver Figura 44d) se puede observar en una disminución del retardo con respecto al escenario tres. Esto se debe a que el retardo se calcula a partir de los paquetes que llegan a su destino y en este escenario, la PLR se incrementa considerablemente, lo cual reduce la cantidad de paquetes con los cuales se calcula el retardo. No obstante, se observa que el modelo con el mecanismo de compresión tiene un mejor desempeño a medida que se incrementan las llamadas simultáneas.

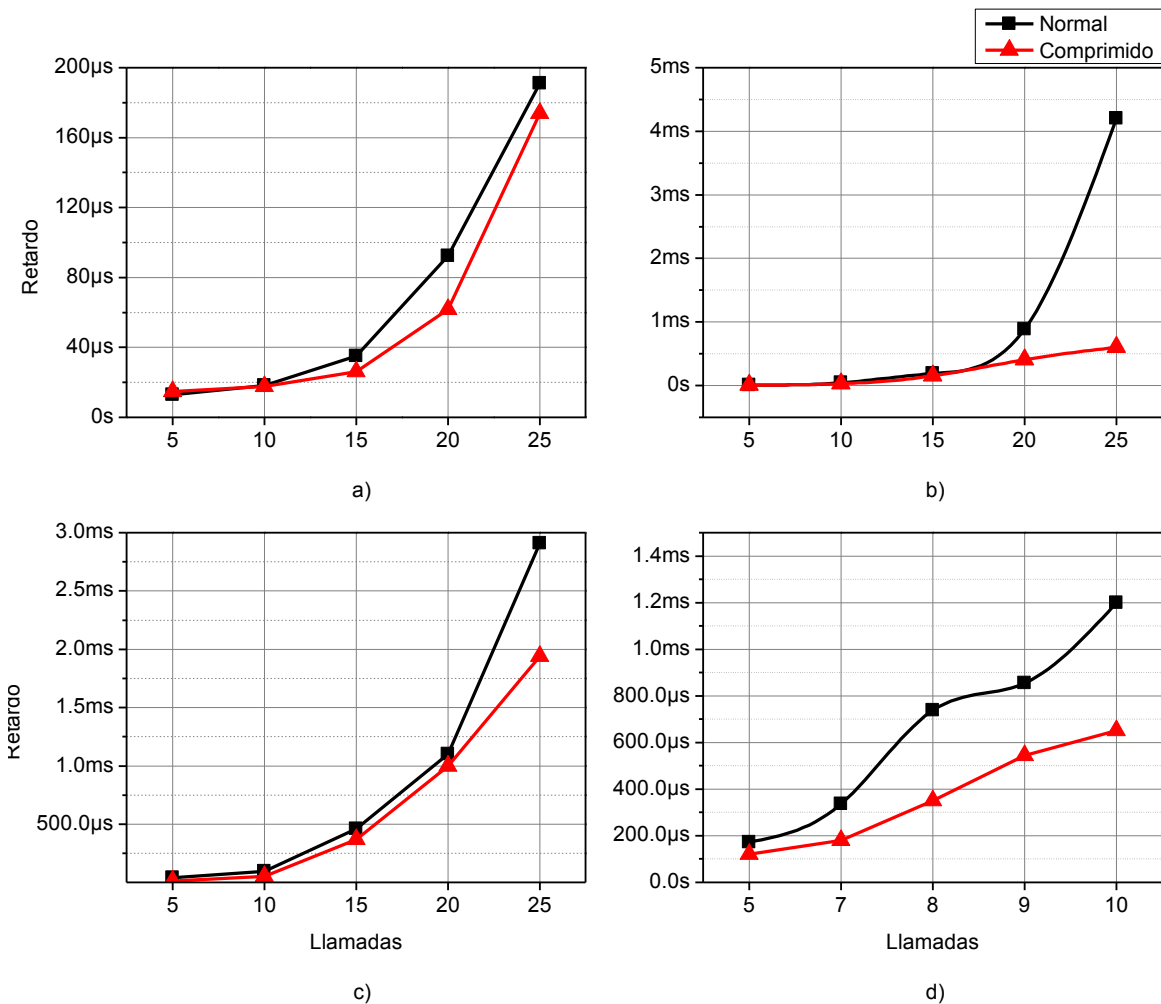


Figura 44. Retraso observado en la capa MAC

6.5 Tráfico de la capa MAC

En esta sección se presenta la cantidad de información que se transmite por el canal inalámbrico, con el modelo que implementa el mecanismo de compresión y el modelo de referencia (ver Figura 45). En todos los casos se puede observar una

disminución de cerca del 50% en la cantidad de información que se transmite con el modelo con compresión. Esta disminución puede ser importante para aquellos equipos que dependen de pilas eléctricas para su funcionamiento, ya que a menor cantidad de bits que se transmiten, la demanda por energía es menor, lo cual alarga la vida de las pilas.

Se puede observar que en la Figura 44d, se presenta una disminución en la cantidad de información transmitida con respecto al escenario tres. Esto se debe a que la PLR se incrementó en el escenario cuatro, y en consecuencia, la cantidad de paquetes con las que se calcula la presente métrica fue menor que en el escenario tres.

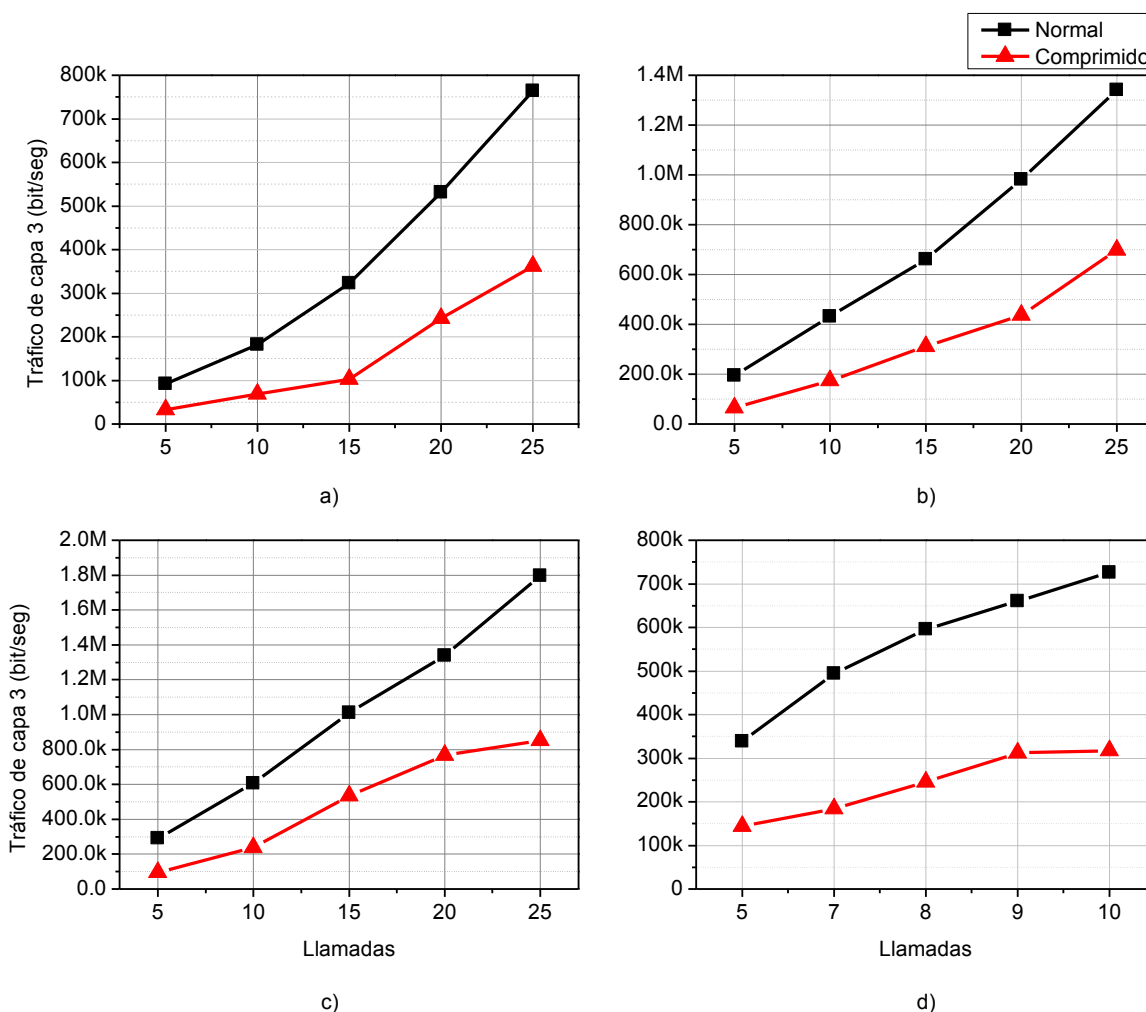


Figura 45. Tráfico de la capa mac

6.6 Discusión de los resultados

Las simulaciones mostraron que con un enrutador, el modelo de referencia mantiene sus principales parámetros de desempeño muy por debajo de los valores recomendados, lo cual permite mantener una comunicación de buena calidad. Si bien el mecanismo de compresión presenta ligeras mejoras con respecto al modelo de referencia, éstas no impactaran sustancialmente en la calidad que perciban los usuarios. La Figura 46 muestra un comparativo del desempeño de ambos modelos con respecto al retardo extremo a extremos y la PLR. En ambos casos, el retardo está por debajo de los 90ms y la PLR es menor al 0.12%.

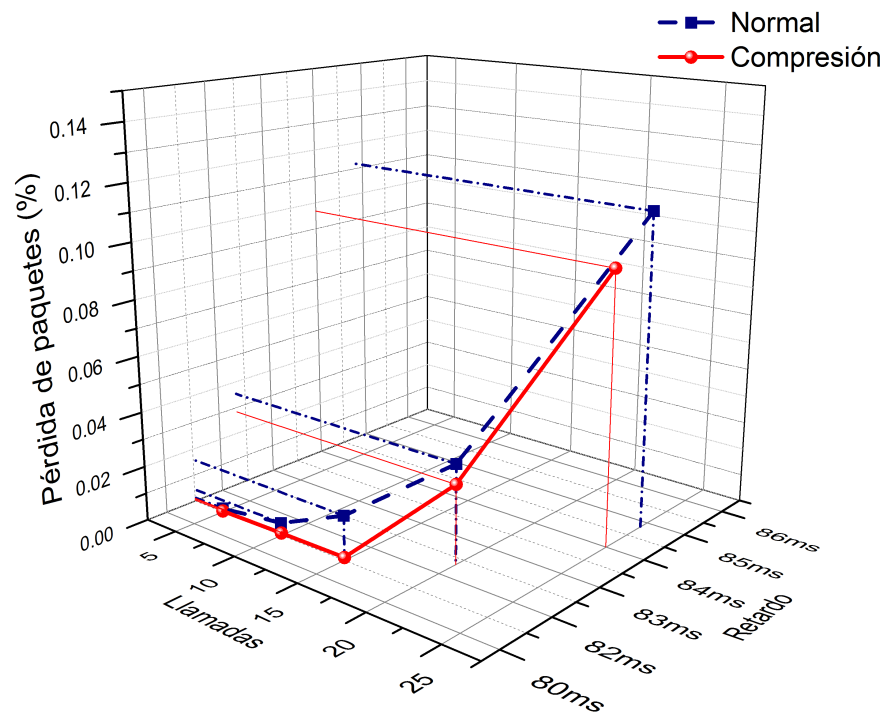


Figura 46. Retardo y PLR correspondiente al escenario uno

Debido a lo anterior, el uso de un mecanismo de compresión de encabezados en un escenario similar sería poco recomendable, si consideramos que el añadir paquetes de señalización para establecer los contextos mejoraría marginalmente la calidad y capacidad de las llamadas. Para dispositivos que se alimenten a través de

baterías, el uso del mecanismo de compresión ayudaría a extender la vida de las baterías debido a la reducción en la cantidad de bits que se tienen que transmitir.

La Figura 47 muestra el comparativo del retardo y la PLR con respecto al número de llamadas correspondiente al escenario con dos saltos y se indica con una raya naranja el umbral de la PLR correspondiente al 1%. Aunque el retardo se sigue manteniendo por debajo de los 150ms con 25 llamadas en ambos modelos, la PLR tiene variaciones importantes a partir de 20 flujos que muestran que el mecanismo de compresión propuesto permite obtener flujos con una PLR menor a la obtenida con el modelo sin compresión lo que se reflejaría en una mejor percepción de calidad por parte del usuario. Si bien con 20 flujos, el modelo sin compresión presentó una PLR menor a 1%, ésta fue prácticamente el doble que la obtenida con compresión. Con 25 flujos, el modelo sin compresión rebasa el máximo PLR recomendado hasta llegar 1.3% la cual sería fácilmente percibido por los usuarios. En este escenario, el mecanismo de compresión permite mantener un 60% más de llamadas con bajo retardo y bajo PLR que con el modelo sin compresión.

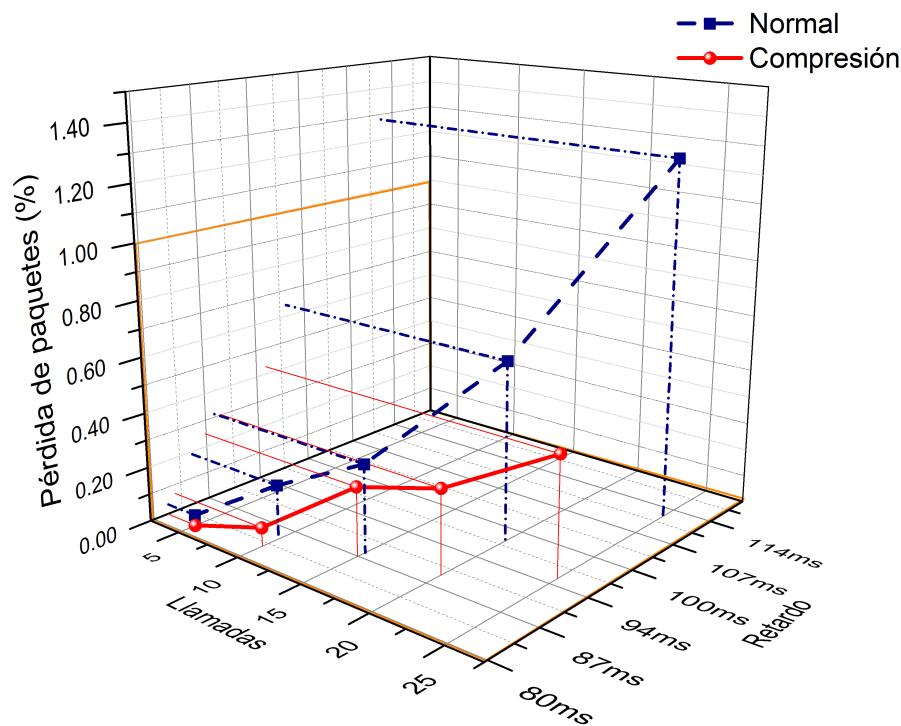


Figura 47. Retardo y PLR correspondiente al escenario dos

En la Figura 48 se puede observar la respuesta en el retardo y la PLR del escenario tres. En la figura se han resaltado los valores recomendados para estos dos parámetros. El polígono naranja indica la zona en donde el retardo es menor a 150ms y la PLR es menor al 1%. Una línea azul verde delimita la región donde las llamadas no tienen una calidad excelente, pero se pueden considerar como aceptables. En este caso el retardo es menor a 200ms y la PLR es menor al 5%.

El modelo sin compresión solo permite mantener cinco llamadas simultáneas con una calidad excelente ya que al incrementar a 10 llamadas, el retardo se incrementa rápidamente a 165ms y la PLR se duplica al 2%, lo que equivale a mantener conversaciones con una calidad aceptable. A diferencia de este modelo, el mecanismo de compresión permite duplicar el número de flujos con una PLR y un retardo dentro de los límites recomendados para una calidad excelente. Así mismo, considerando los límites de PLR de 5% y un retardo de 200ms, el mecanismo de compresión permite hasta 20 flujos dentro de estos parámetros, mientras que el modelo sin compresión solamente permite 10.

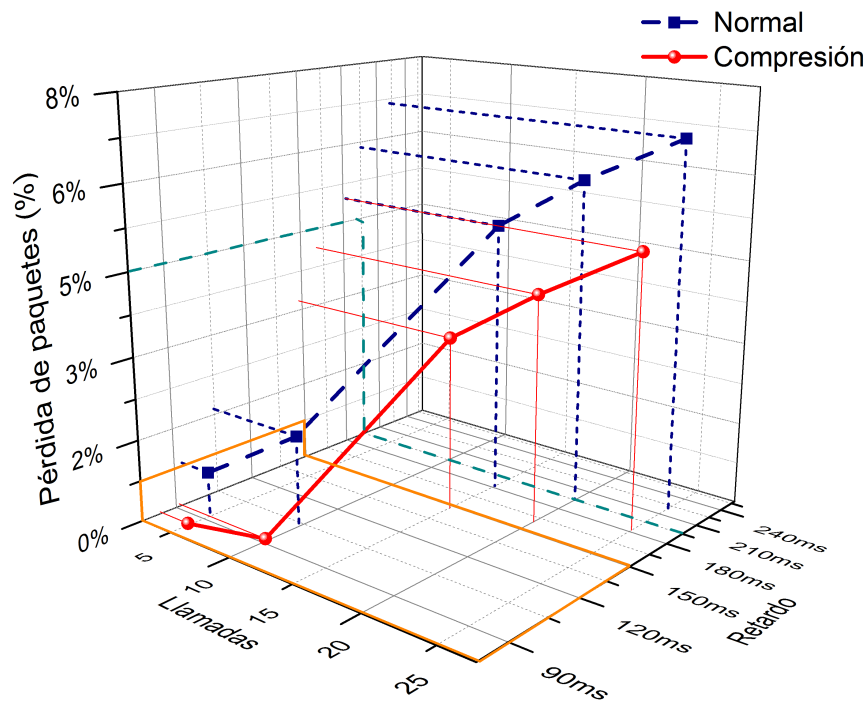


Figura 48. Retardo y PLR correspondiente al escenario tres

Finalmente, en la Figura 49 se muestran los resultados obtenidos con respecto al retardo y la PLR del escenario cuatro. La línea azul verde en el gráfico delimita la región donde las llamadas se pueden efectuar con una calidad aceptable. El modelo sin compresión presentó un retardo y una PLR superior a los valores recomendados para cualquier número de flujos. Esta condición limita el uso del modelo sin compresión para aplicaciones de VoIP en una red con cuatro enrutadores. Por otro lado, el modelo con el mecanismo de compresión permite mantener hasta siete conversaciones con una calidad aceptable. A partir de la octava llamada la PLR se incrementa por arriba del 5% afectando considerablemente la calidad de la voz.

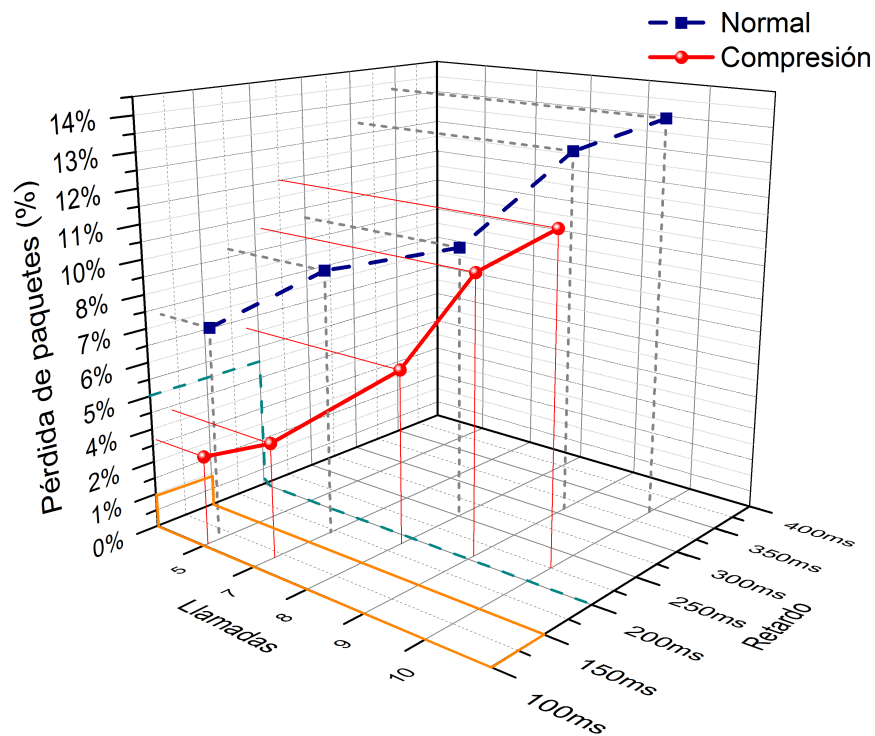


Figura 49. Retardo y PLR correspondiente al escenario cuatro

Estos resultados muestran que una infraestructura instalada en una población rural puede dar soluciones de acuerdo a su contexto, cuando de antemano se puedan identificar las condiciones que harían que dicha infraestructura cumpla con, no sólo las expectativas de la población, sino también con el nivel de sus habilidades digitales, y las condiciones socioeconómicas y culturales del entorno. Las

condiciones iniciales de los proyectos para reducir la brecha digital deben tomar en cuenta estos factores, a partir de los cuales se genera conocimiento de naturaleza tecnológica que pueda otorgar soluciones acordes a las necesidades de los habitantes de las poblaciones rurales, y eventualmente lograr un mayor grado de sustentabilidad operativa de la infraestructura.

7 Conclusiones

La compresión de encabezados es un mecanismo que permite reducir la cantidad de información que se transmite por el canal inalámbrico. En este trabajo se presentó un mecanismo alternativo de compresión que permite obtener los mismos niveles de eficiencia de compresión en una red inalámbrica 802.11 que los esquemas de compresión cRTP y RoHC, pero sin el requerimiento de mantener sincronizados los contextos del compresor y descompresor.

La compresión de los campos estáticos de los encabezados RTP/UDP/IPv6, así como la reducción del tamaño de las direcciones MAC del protocolo 802.11 a través del uso de direcciones virtuales de 8 bits, permitieron obtener una eficiencia de compresión ligeramente superior a las ofrecidas por cRTP y RoHC (0.47 contra 0.41 de RoHC). Una de las principales ventajas de utilizar solamente la compresión de los campos estáticos, es que los contextos no se ven afectados por la pérdida de paquetes, a diferencia de RoHC y, por lo tanto, no es necesario introducir paquetes de

señalización para restablecer los contextos. A diferencia del mecanismo propuesto, RoHC implementa mecanismos de robustez para no perder los contextos ante la presencia de pérdidas aleatorias de paquetes. Sin embargo, cuando se presentan pérdidas de paquetes consecutivos, el algoritmo de compresión no puede mantener sincronizado el contexto y requiere de solicitar el restablecimiento del mismo.

Los resultados de las simulaciones mostraron que prácticamente en todos los escenarios el mecanismo de compresión presentó un mejor desempeño en lo que respecta al PLR y al retardo extremo a extremo (ver Figura 50). En el caso del primer escenario, ambos modelos mantuvieron los parámetros de QoS por debajo de los valores recomendados con el máximo número de llamadas. Sin embargo, la compresión logró mantener una PLR y un retardo menor al obtenido por el modelo sin compresión, lo que se traduce al usuario en una mejor calidad de la voz transmitida.

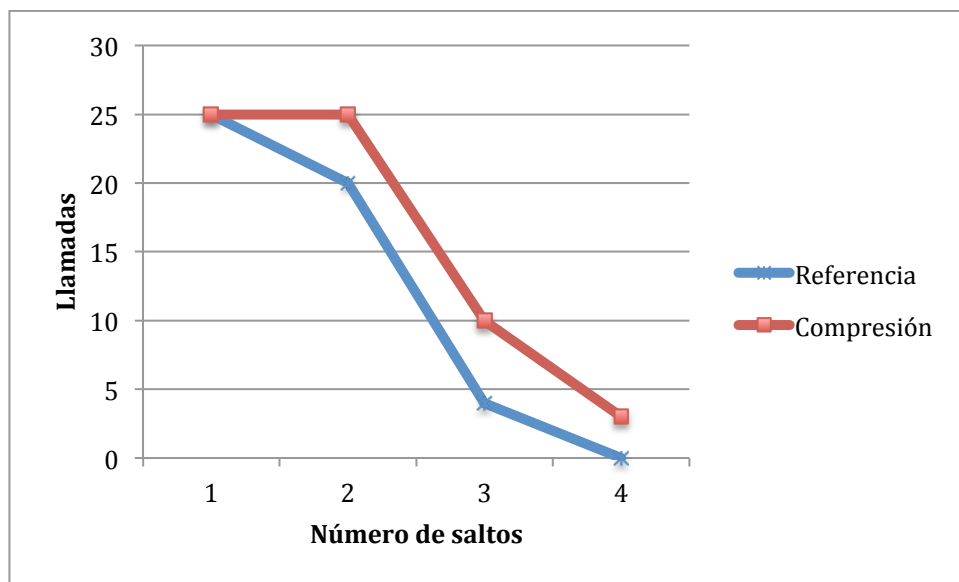


Figura 50. Capacidad de llamadas en relación al número de saltos

Las mejoras ofrecidas por la compresión se empiezan a hacer más evidentes en los escenarios con dos, tres y cuatro saltos. La capacidad de las llamadas del mecanismo de compresión es siempre mayor que el mecanismo de compresión, sin embargo, debido a la acumulación de retardos de enrutamiento, procesamientos y de

contención del canal inalámbrico, en los escenarios con tres y cuatro saltos la capacidad de la red se reduce considerablemente hasta llegar a un máximo de cuatro llamadas simultáneas.

Un aspecto que toma importancia, principalmente en los escenarios tres y cuatro, son los tiempos de procesamiento debido al esquema de acceso al canal inalámbrico. Al reducir el tamaño de las tramas, los retardos en las colas de enrutamiento de la capa IP, el retardo debido al mecanismo de evasión de colisiones de la capa MAC y los retardos debido a las retransmisiones, se hacen más significativos debido al reducido tamaño de la trama, lo cual reduce la capacidad de llamadas de la red.

Considerando la capacidad de llamadas y el área de cobertura, los escenarios dos y tres son los que ofrecen las mejores condiciones para cubrir las necesidades de comunicación de una comunidad rural. El escenario dos puede cubrir un área de cerca de 0.5 km², mientras que en el escenario tres se pueden cubrir hasta 0.75 km².

Considerado la limitada capacidad del escenario con tres saltos, se considera que la arquitectura de la red para una comunidad rural debe considerar como máximo dos saltos en una topología en estrella como la mostrada en la Figura 51, la cual puede cubrir un área de aproximadamente de 1 km².

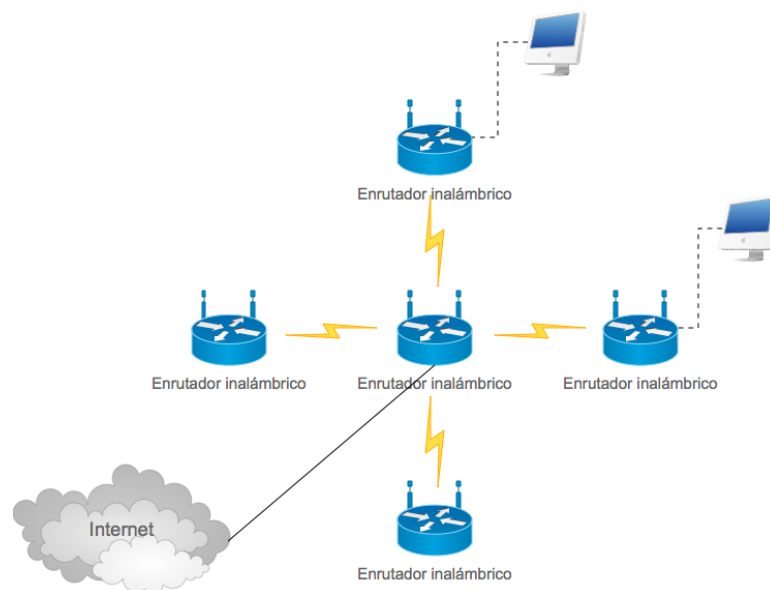


Figura 51. Topología estrella de dos saltos

La configuración en estrella permite incrementar el área de cobertura, y si se subdivide en cuatro subredes (en donde el nodo central cuenta con cuatro interfaces inalámbricas operando en un canal distinto), es posible incrementar la capacidad de la red a 100 llamadas simultáneas. De lo anterior se observa que la arquitectura desarrollada es una alternativa tecnológica viable para dotar en forma distribuida a hogares dispersos en poblaciones rurales de servicios de VoIP.

Debido a la limitada penetración de las redes de telecomunicaciones en comunidades rurales, y con la premisa de reducir la brecha digital, los responsables de la política pública y los proveedores de equipos y servicios, en la mayoría de los casos se han visto tentados a implementar sistemas de comunicaciones de última generación en comunidades rurales con la hipótesis de que éstos van a ser inmediatamente utilizados por los habitantes de dichas comunidades. Sin embargo, muchos de los resultados han sido desalentadores: la mayoría de los habitantes ignoran la nueva tecnología y prefieren seguir utilizando los medios ya conocidos por ellos. Aunque se han empezado a realizar estudios de carácter interdisciplinario para tratar de entender la dinámica social y cultural de estas comunidades, éstos no han sido suficientes para lograr un aprovechamiento eficiente de la infraestructura de las TIC instalada.

Los resultados obtenidos en la población de San Miguel Tlacotepec, en donde se trató de implementar el servicio de videoconferencia, dieron pauta para replantear los objetivos del proyecto sobre el uso de las TIC en comunidades rurales enfocándose en una solución tecnológica que fuera compatible con su dinámica social. De esta manera, la infraestructura de banda ancha puede ser aprovechada y explotada eficientemente al resolver una necesidad propia de la comunidad. En el caso de San Miguel Tlacotepec, siendo la telefonía el principal medio de comunicación para contactar a sus familiares que han emigrado (la mayoría de los hogares no cuentan con líneas fijas, por lo que usan casetas públicas para este fin), se propuso descentralizar el acceso a internet (del Centro de Comunitario Digital) hacia los hogares para ofrecer telefonía dentro de las mismas. De esta manera, de forma transparente y sin la necesidad de adquirir nuevas habilidades, los habitantes podrían

beneficiarse de la infraestructura de TIC y al mismo tiempo, se podría gradualmente familiarizarlos con nuevas aplicaciones multimedia.

Reconocer el fenómeno de la brecha digital como un sistema complejo, permitirá conocer la manera en que los diferentes componentes que integran la problemática, como los regulatorios, tecnológicos, socioeconómicos y culturales, definen la dinámica social de las comunidades. Al analizar la problemática de una manera integral, se podrán identificar aquellas áreas de oportunidad en que las TIC pueden tener un impacto importante en el desarrollo de las comunidades, así como identificar aquellos elementos inhibidores que impiden la adopción tecnológica por parte de las comunidades. Esto quiere decir que las propuestas de soluciones serán singulares y éstas, no necesariamente se podrán replicar en otras comunidades con características diferentes.

Por otro lado, el involucramiento de la comunidad en todas las etapas del proyecto puede ser un factor determinante en el grado de éxito que se pueda lograr. Con una poca participación comunitaria, es casi un hecho que la continuidad y sustentabilidad de los proyectos se vea truncada una vez que los que llevan a cabo los proyectos se retiren de lugar. Si por el contrario, ocurre un involucramiento proactivo por parte de líderes y actores clave de la comunidad, se facilitarían los procesos de apropiación de la tecnología por parte de la comunidad y por lo tanto, se crearán condiciones que permitan aprovechar las TIC para el beneficio social.

El enfoque propuesto considera entonces, tomar en cuenta los aspectos regulatorios que afectan a la comunidad, caracterizar de entrada cada población rural desde el punto de vista tecnológico (en relación a lo que la UIT considera para poblaciones rurales [54]), socioeconómico y cultural. En función de lo anterior se encontrarán alternativas que se adapten a las necesidades del contexto particular de cada población. La contribución central de este trabajo ha sido el proveer una solución tecnológica asociada a las condiciones de la dinámica social de una población migrante. Para ello fue necesario el observar el proceso de apropiación tecnológica de la comunidad de San Miguel Tlacotepec por espacio de cinco años y ofrecer un esquema operativo que se adapte a la condición sociocultural de la población. Se

propone así, una solución socio-técnica que emerge del conocimiento de la realidad social de la comunidad y de cómo la tecnología puede dar respuesta a sus requerimientos y modus-operandi.

De aquí que para cada comunidad rural se deben buscar soluciones acorde a sus condiciones, no se pueden tratar las poblaciones rurales con un mismo patrón y enfoque general para lograr que las TIC se conviertan en vehículos para el desarrollo sustentable.

7.1 Trabajo futuro

Los tiempos requeridos para la elaboración de la tesis limitan los alcances del trabajo de investigación, lo cual abre la puerta a un trabajo futuro que puede enriquecer los resultados aquí obtenidos.

Desde la perspectiva tecnológica, se observa que la reducción en el tamaño de las tramas debido a la compresión de los encabezados, permite incrementar el número de tramas procesadas por segundo en los nodos enrutadores. Sin embargo, es necesario realizar mayor investigación sobre la posibilidad de implementar mecanismos de agregación de paquetes, los cuales consisten en transmitir en una misma trama MAC dos o más paquetes IP para reducir los tiempos de enrutamiento y contención del canal inalámbrico. Estos mecanismos tienen implicaciones que pueden llegar a afectar el retardo extremo a extremo de los paquetes de VoIP.

Otro aspecto que no se tomó en cuenta en este trabajo tiene que ver con la aplicación de mecanismos de calidad de servicio, debido a que la especificación 802.11a y 802.11g no cuentan con una implementación que permita ofrecer niveles de calidad de servicio a los flujos de VoIP. Por otro lado, el gobierno de México, a través de la Coordinación de la Sociedad de la Información y el Conocimiento¹, y la Red Nacional de Impulso a la Banda Ancha², está desplegando una red WiMAX y una

¹ <http://www.sct.gob.mx/informacion-general/areas-de-la-sct/coordinacion-de-la-sociedad-de-la-informacion-y-el-conocimiento/>

² <http://www.redniba.mx/>

satelital a nivel nacional [55] para ofrecer servicios de banda ancha a una gran cantidad de comunidades rurales. Las redes WIMAX cuentan con mecanismos para ofrecer calidad de servicio, por lo que sería importante ampliar la aplicación del esquema propuesto a estas tecnologías para asegurar la interoperabilidad.

Los desarrollos tecnológicos encaminados a la reducción de la brecha digital en comunidades rurales deben ser producto de un enfoque interdisciplinario que permita obtener resultados que tomen en cuenta las dinámicas socioeconómicas y culturales de las comunidades beneficiadas. Se recomienda abordar el problema desde una perspectiva más integral, como por ejemplo, la metodología de sistemas complejos. A partir de las experiencias y el conocimiento que se pueda obtener a través de este nuevo enfoque, se debe generar un marco conceptual que coadyuve a la generación de políticas públicas que consideren los aspectos tecnológicos, así como las dinámicas socioeconómicas y culturales inmersas en los procesos de reducción, de la brecha digital en las comunidades rurales.

8 Bibliografía

- [1] Santoyo, A.S. y A.A. Ramade. *Application of emerging wireless technologies for videoconference and telehealth in rural migrant communities in Oaxaca, Mexico.* in *Innovations for Digital Inclusions, 2009. K-IDI 2009. ITU-T Kaleidoscope.* 2009. Mar del Plata, Argentina.
- [2] González, J.A., Digitalizados por decreto: cibercultur@ o inclusión forzada en América Latina. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas, Revista e Investigación y Análisis.* Universidad de Colima, XIV(27). pp 47-76. 2008
- [3] Gallopín, G., *Sostenibilidad y desarrollo sostenible.* Serie medio ambiente y desarrollo. Vol. 64. 2003: Organización de las Naciones Unidas. 44pp.
- [4] Castañares, E.J., *Sistemas complejos y gestión ambiental: el caso del Corredor Biológico Mesoamericano México.* 2009.
- [5] Moreno, M.M., *La epistemología genética, la interdisciplina y los sistemas complejos como base para generar comunidades emergentes de conocimiento,* in *XX Encuentro Nacional AMIC 2008.* 2008: Monterrey, México.
- [6] García, R., *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.* 2006: Ed. Gedisa.
- [7] Castells, M., *La era de la información: economía, sociedad y cultura.* . Vol. 1: La sociedad red. 2000: Alianza Editorial.

- [8] OECD, *OECD Guide to Measuring the Information Society*. 2005: OECD Publishing.
- [9] Valdivia, I.J., *Las políticas de tecnología para escuelas en América Latina y el mundo: visiones y lecciones*. 2008, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas: Santiago de Chile.
- [10] Asociación Latinoamericana de Integración, *La Brecha Digital y sus repercusiones en los países miembros de la ALADI*. 2003.
- [11] Serrano, A. y E. Martínez, *La brecha digital: mitos y realidades*. 2008: Universidad Autónoma de Baja California.
- [12] Wyatt, S. y F. Henwood, *Critical perspectives on technologies, in/equalities and the information society*, in *Technology and in/equality: questioning the information society*. 2000, Routledge: London.
- [13] Armenta, A., *et al.*, The new digital divide: the confluence of broadband penetration, sustainable development, technology adoption and community participation. *Information Technology for Development*, 18(4). 345-353. 2011
- [14] Serrano, A., *et al.*, *Expanding the telecommunications options in rural migrant communities in Oaxaca, Mexico through applications of emerging wireless technologies*, in *International Technology, Education and Development Conference*. 2008.
- [15] Parmar, V., A Multidisciplinary Approach to ICT Development. *Information Technologies & International Development*, 5(4). 89-96. 2009
- [16] Salazar, G.P. y J.I.C. González, *El Sistema Nacional e-México a diez años de distancia: un nuevo discurso con bajos niveles de interacción* en *Version*. No 27. Septiembre de 2011. Universidad Autónoma Metropolitana
- [17] Judith, M., J.R. Gil-Garcia, y A.-N. Armando, *Policies on Access to Information Technologies: The Case of e-Mexico*. *Information Technologies & International Development*; Vol 7, Issue 2 - Summer 2011, 2011
- [18] Secretaria de Comunicaciones y Transportes. *Programa e-México*. [Documento WWW]; URL: <http://www.e-mexico.gob.mx/>.
- [19] Rico, J.A.C. *Estrategias para fomentar el teletrabajo en las comunidades rurales de México, el caso de la comunidad indígena de Matlapa, San Luis Potosí, México*. in *Telework 2010 Argentina, 15th International ITA Workshop*. 2010. Argentina.
- [20] Galperin, H. y F. Bar, The Microtelco Opportunity: Evidence from Latin America. *Information Technologies and International Development*, 3(2). 73-86. 2007
- [21] Davidson, J., J. Peters, y B. Grace, *Voice over ip fundamentals*. 2000: Cisco Press. 408.
- [22] Middleton, J., *Voice Over IP: Setting Phone Service Free*, en *IEEE Spectrum*. No 1. Enero de 2011. IEEE
- [23] Bosnell, J., *VoIP Q4 2010 Short Report*. 2011, Point Topic Ltd.

- [24] Marzuki, A.S.W., *et al.* Performances analysis of VoIP over 802.11b and 802.11e using different CODECs. in *Communications and Information Technologies (ISCIT), 2010 International Symposium on.* 2010.
- [25] *ITU-T Recommendation G.711. Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies.* 1988.
- [26] *ITU-T Recommendation G.729 Annex A. Reduced complexity 8 kbit/s CS-ACELP speech codec.* 1996.
- [27] *ITU-T Recommendation G.723.1. Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s.* 2006.
- [28] *ITU-T Recommendation G.726. 40, 32 24, 16kbit/s Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM).* 1990.
- [29] Schulzrinne, H., *et al.* RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 1889. Enero de 1996
- [30] Postel, J. User Datagram Protocol. RFC 768. Agosto de 1980
- [31] Information Sciences Institute. DOD Standard: Internet protocol. RFC 760. Enero de 1980
- [32] IEEE, IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), 1-1076. 2007
- [33] Skoglund, J., *et al.*, *Voice over IP: Speech Transmission over Packet Networks*, in *Springer Handbook of Speech Processing*, J. Benesty, M.M. Sondhi, and Y. Huang, Editors. 2008, Springer Berlin Heidelberg. p. 307-330.
- [34] Deering, S. y R. Hinden. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. RFC 2460. Diciembre de 1998
- [35] Farber, D.J., G.S. Delp, y T.M. Conte. A Thinwire Protocol for connecting personal computers to the Internet. RFC 914. Septiembre de 1984
- [36] Jacobson, V. Compressing TCP/IP Headers for Low-Speed Serial Links. RFC 1144. Febrero 1990
- [37] Casner, S. y V. Jacobson. Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links. RFC 2508. Febrero de 1999
- [38] Bormann, C., *et al.* Robust Header Compression (ROHC): Framework and four profiles: RTP, UDP, ESP, and uncompressed. RFC 3095. Julio de 2001
- [39] Westphal, C. y R. Koodli. *Stateless IP header compression.* in *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on.* 2005.
- [40] Reinhardt, A., *et al.* *SFHC.KOM: Stateful header compression for wireless sensor networks.* in *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on.* 2010.

- [41] do Nascimento, A.G.O., *et al.* *An Alternative Approach for Header Compression Over Wireless Mesh Networks.* in *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2009. WAINA '09. International Conference on.* 2009.
- [42] Arango, J., M. Faulkner, y S. Pink, *Compressing MAC Headers on Shared Wireless Media,* J. Zheng, et al., Editors. 2010, Springer Berlin Heidelberg. p. 576-591.
- [43] Schurgers, C., G. Kulkarni, y M.B. Srivastava, Distributed on-demand address assignment in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on,* 13(10). 1056-1065. 2002
- [44] Ali, M. y Z.A. Uzmi. *An energy-efficient node address naming scheme for wireless sensor networks.* in *Networking and Communication Conference, 2004. INCC 2004. International.* 2004.
- [45] *OPNET Modeler v14.5.* URL: <http://www.opnet.com>.
- [46] Braden, R., *RFC 1122 Requirements for Internet Hosts - Communication Layers.* 1989.
- [47] Braden, R., *RFC 1123 Requirements for Internet Hosts - Application and Support.* 1989.
- [48] Chen, Y., T. Farley, y N. Ye, QoS Requirements of Network Applications on the Internet. *Inf. Knowl. Syst. Manag.,* 4(1). 55-76. 2004
- [49] Daengsi, T., *et al.,* Comparison of Perceptual Voice Quality of VoIP Provided by G.711 and G.729 Using Conversation-Opinion Tests. *International Journal of the Computer, the Internet and Management,* 20(1). pp 21-26. 2012
- [50] ITU., T.S.S.o., *ITU-T Recommendation G.114: Transmission Systems and Media : General Recommendations on the Transmission Quality for an Entire International Telephone Connection : One-Way Transmission Time.* 1994: International Telecommunication Union.
- [51] Dimova, R., G. Georgiev, y Z. Stanchev. *Performance Analysis of QoS Parameters for Voice over IP Applications in a LAN Segment* in *International Scientific Conference Computer Science'2008.* 2008.
- [52] Sziget, T. y C. Hattingh, *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs (Networking Technology).* 2004: Cisco Press.
- [53] Barbosa, A.V., M.F. Caetano, y J.L. Bordim, The Theoretical Maximum Throughput Calculation for the IEEE 802.11g Standard. *International Journal of Computer Science and Network Security,* 11(4). 136-143. 2011
- [54] *Diagnóstico Regional en Materia de Políticas, Estrategias y Regulaciones de las Telecomunicaciones y Desarrollo de las Tecnologías de la Comunicación e Información (TIC): Aplicaciones en las áreas de Educación, Salud y Catástrofes en Zonas Rurales, Regiones Aisladas y Urbano-Marginales.* 2007, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- [55] Secretaria de Comunicaciones y Transportes, *SCT da a conocer el fallo de la licitación de conectividad a internet a 10 mil sitios a través de operadores*

satelitales comerciales, in *Comunicado 143-12*. 21 de noviembre de 2012:
México, D.F.

APENDICE A. CASO OAXACA

Como parte de un esfuerzo binacional entre México y Estados Unidos para buscar mecanismos que coadyuven a la reducción de la brecha digital, la Universidad de California en San Diego (UCSD), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE) y la empresa Qualcomm emprendieron el proyecto “Bridging the Digital Divide and Reducing Poverty in Rural Mexico: New Approaches and Improved Human Capacity to Address Telecom/Microfinance Linkages”. Una de las metas del proyecto fue observar el impacto que la videoconferencia puede tener en comunidades afectadas por la migración, por lo que durante 2006 se realizaron visitas a diferentes comunidades del estado de Oaxaca para identificar aquellas que tuvieran un alto índice de migración y que ésta se concentrará en alguna comunidad del sur de estado de California, en los Estados Unidos. Resultado de este trabajo de campo se identificaron a la comunidades de San Miguel Tlacotepec (SMT), en el noroeste del estado de Oaxaca, México y la ciudad de Vista al norte de San Diego en el estado de California (Ver Figura A.1.).

San Miguel Tlacotepec es una pequeña comunidad de la mixteca oaxaqueña con alrededor de 2500 habitantes. La mayoría de ellos son personas mayores, adolescentes y niños ya que la mayoría de los adultos emigran a los Estados Unidos, principalmente a la ciudad de Vista. La economía del pueblo se basa principalmente en las remesas que los migrantes envían. Para apoyar el desarrollo de su comunidad de origen, los tlacotepenses residentes en Vista se han organizado en un comité de migrantes (CMV). Antes del inicio del proyecto y con el apoyo del CMV, se donaron computadoras que fueron instaladas en el kiosco principal de San Miguel. Al inicio del proyecto, los coordinadores del proyecto tuvieron reuniones con la administración municipal de San Miguel y con el CMV, y se les propuso la idea de establecer infraestructura de banda ancha en San Miguel Tlacotepec para llevar a cabo videoconferencias entre los migrantes en Vista y sus familiares en San Miguel, lo cual se aceptó favorablemente.



Figura A.1. Ubicación de las comunidades de Vista, California y San Miguel Tlacotepec, Oaxca

A pesar del desarrollo de infraestructura en los Estados Unidos, los migrantes de San Miguel Tlacotepec en la ciudad de Vista, tenían un limitado acceso a servicios de banda ancha. A diferencia de México, en donde en la mayoría de las ciudades urbanas y semiurbanas cuentan con cafés Internet, en Vista no existen muchos sitios públicos para el acceso a Internet. Para facilitarles el acceso a Internet, se instalaron dos puntos de acceso: uno en un centro comunitario y otro, en la casa del presidente del comité de migrantes. En ambos puntos, se instalaron computadoras laptop con webcam y un tarjeta 3G de acceso a Internet proporcionadas por la empresa Qualcomm. De esta manera, los miembros de la comunidad de migrantes de SMT, podrían asistir a cualquiera de estos dos lugares para comunicarse con sus familiares en SMT sin costo alguno.

Por otra parte, para darle conectividad a los equipos instalados en el kiosco de SMT, a mediados de 2007 se contactó a la empresa Globalsat (un proveedor de acceso satelital) la cual acordó proporcionar en préstamo un equipo VSAT incluyendo un acceso a Internet asimétrico de 300 kbps de bajada y hasta 100 Kbps de subida. A finales del 2007, se terminaron con los estudios técnicos de Globalsat y se llevó a cabo la instalación de la antena. Las primeras pruebas de videoconferencia se llevaron a cabo con la aplicación de Skype, sin embargo, la versión utilizada obtuvo una calidad muy pobre en la señal de video debido a la poca compresión del video que utilizaba dicha versión, por lo que se optó por usar el programa de Windows Messenger, el cual, al utilizar una mayor compresión del video, ofreció una mejor calidad de video.

La calidad de video de las primeras videoconferencias que se hicieron entre SMT y Vista tuvieron calidad marginal, sin embargo fueron percibidas como “aceptables”. Dadas las restricciones de ancho de banda se observaron retardos e interrupciones frecuentes. El presidente del CMV comentó que esto podría desmotivar a los migrantes al uso de la aplicación, por lo que recomendó que se mejorara la calidad del video antes de que se pudiera promover el servicio entre los miembros de la comunidad de migrantes. Aunque Globalsat elevó el ancho de banda del enlace a poco más de 700 kbps de bajada y 500 kbps de subida, el retardo del enlace satelital, al cual no estaban acostumbrados los migrantes, dificultaba el tener una comunicación fluida.

A principios del 2008, hubo cambio de presidencia municipal en SMT. El nuevo presidente municipal no estaba al tanto del proyecto y no comprendía muy bien cual era el propósito de la infraestructura instalada ni los beneficios que se obtendrían. Al ser de un grupo político diferente al del presidente municipal anterior, muchos de los proyectos iniciados por la anterior administrador fueron descontinuados por lo que se tuvo que hacer una labor de concientización con el nuevo presidente municipal para que continuara apoyando el proyecto, lo cual afortunadamente se logró.

Para incrementar la calidad de las videoconferencias y reducir el retardo del enlace satelital, se optó llevar conectividad inalámbrica de DSL al Kiosco de SMT (Ver Figura A.2.). Para esto se instalaron dos enlaces inalámbricos WiFi punto a punto, con una distancia total aproximada de 14 km desde la comunidad vecina de Juxtlahuaca, la

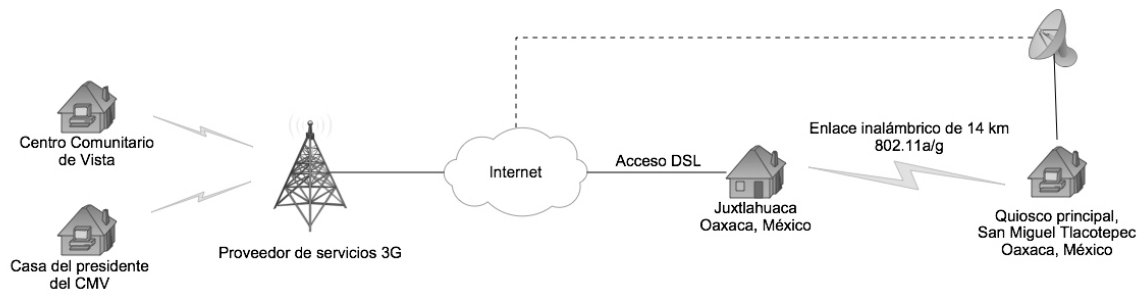


Figura A.2. Arquitectura de la red implementada

la cual cuenta con el servicio de DSL por parte de la compañía telefónica. Se contactó con un comerciante en Juxtlahuaca que prestó su casa para instalar una de las antenas y se convino que la presidencia municipal de SMT pagara la renta mensual del servicio telefónico, que incluía el Internet de 2 Mbps. De esta manera, 5 computadoras del kiosco quedaron conectadas al enlace satelital (para navegar en Internet) y las 4 computadoras restantes quedaron conectadas al servicio DSL (para navegar en Internet y la videoconferencia). Con el servicio DSL, la calidad de las videoconferencias mejoró sustancialmente y se hizo oficial el servicio entre los miembros de ambas comunidades.

Las primeras videoconferencias permitieron que un padre que había dejado el pueblo de SMT 20 años atrás para trabajar en Vista, observará en vivo, por primera vez, a su nieta de 10 años. Sin embargo, la respuesta no fue la esperada. Algunos residentes de SMT, principalmente las personas mayores, fueron renuentes a utilizar la aplicación ya que no se sentían cómodos al entrar al kiosco donde había computadoras y cables, y mucho menos hablar por medio de una pantalla de computadora. Algunos otros comentaban que hablar por teléfono era suficiente para mantener el contacto. Otro aspecto que complicaba las videoconferencias era el hecho de que había que ponerse de acuerdo, tanto en Vista como en SMT, sobre el horario en que se llevaría a cabo la videoconferencia. Los migrantes en Vista solamente podían ir al Centro Comunitario o a la casa del presidente del CMV después de salir de trabajar, lo que generalmente era después de las 5:00 pm pero en SMT, por la diferencia de horarios, ya eran las 7:00 pm y en muchas ocasiones el responsable del kiosco no podía estar presente, por lo que la videoconferencia no podía llevarse a cabo. Es decir, más allá de limitaciones técnicas, se enfrentaban retos logísticos y culturales. El servicio de videoconferencia continuó, sin embargo no se implantaron programas de adopción tecnológica, de usabilidad, y lo que es más importante, de construcción de capacidad y participación comunitaria. Aunado a esto, la falta de promoción y difusión del servicio no logró la penetración y apropiación deseada.

Con el objeto de estudiar la evolución del proyecto en el periodo de 5 años, a finales de 2012, se llevó a cabo una visita a SMT. El enlace inalámbrico que proporcionaba servicios de banda ancha ya no se encontraba funcionando debido a diversos problemas de carácter operativo y político. En 2012 se eligió una nueva administración municipal que logró actualizar el equipo de cómputo del kiosco, sin embargo la capacidad de acceso a Internet quedó limitada a 1 Mbps y es compartida

entre las 10 computadoras existentes, lo cual reduce considerablemente el ancho de banda disponible a cada computadora. El enlace actual ya no soporta aplicaciones multimedia como la videoconferencia.

Los resultados obtenidos de este proyecto nos permiten determinar dos aspectos importantes que inhibieron que el proyecto lograra que los tlacotepenses se apropiaran de la tecnología: por un lado, aunque se partió de la hipótesis de que la aplicación de videoconferencia permitiría crear una nueva dinámica de comunicación entre las familias separadas por la migración (tomando en cuenta que hay familias que no se han visto en más de 20 años), la realidad fue que no se consideraron aspectos socio-culturales de los miembros de la comunidad de SMT. Los adultos mayores se sienten más cómodos con los esquemas tradicionales de comunicación como la telefonía, aunque esto represente un costo mas elevado. El uso de cámaras y computadoras puede influir en algunas personas temores derivados de sus creencias, lo cual es un inhibidor importante para acercarse a este tipo de tecnologías. Por otro lado, los procesos de gobernanza de las administraciones municipales y los aspectos políticos del entorno rural juegan un papel fundamental en la adopción de la tecnología, sobre todo cuando se está en las fases iniciales. En el caso de Oaxaca las diferencias políticas que prevalecen en SMT afectaron el sostenimiento de la infraestructura inalámbrica que ofrecía conectividad de DSL al kiosco (la cual, actualmente sería de hasta 10 Mbps), dejando como única opción de conectividad un enlace satelital de 1 Mbps. Este enlace resulta insuficiente para las necesidades crecientes de la población para acceso a Internet, particularmente de adolescentes y jóvenes de la comunidad.