

# ESTADO DEL ARTE DEL IEEE802.11 PARA LA CONECTIVIDAD DE ZONAS RURALES

## STATE OF THE ART OF IEEE802.11 FOR RURAL CONNECTIVITY



### AUTOR

OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ  
Phd, MSc, Ing. Sistemas, Físico  
\*Universidad Industrial de Santander  
Vicerrector de Investigación y  
Extensión  
Vicerectoría de Investigación y  
Extensión  
viceinvext@uis.edu.co  
COLOMBIA

### AUTOR

RICARDO ANDRÉS DIAZ SUÁREZ  
Msc(C), Ing. Electrónico  
\*Universidad Industrial de Santander  
Estudiante  
Escuela de ingenierías eléctrica,  
electrónica y telecomunicaciones.  
rdiazcps@hotmail.com  
COLOMBIA

### AUTOR

JOSE DE JESUS RUGELES URIBE  
Msc, Ing. Electrónico, Eléctrico  
\*\*Universidad Militar Nueva granada  
Docente  
Ingeniería de telecomunicaciones  
jose.rugeles@unimilitar.edu.co  
COLOMBIA

### INSTITUCIÓN

\*UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
UIS  
Universidad Pública  
Ciudad Universitaria  
Carrera 27 Calle 9  
Bucaramanga, Santander  
COLOMBIA

### INSTITUCIÓN

\*\*UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
UMNG  
Institución de educación superior.  
Carrera 11 NO. 101-80  
Bogotá  
COLOMBIA

**INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO:** Proyecto de investigación "Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar". Fecha de inicio: 2006 - Fecha de Finalización: 2010. Realizado por el Grupo de Investigación en Conectividad y Procesamiento de Señal (CPS) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Proyecto financiado por Colciencias y la UIS.

**RECEPCIÓN:** Marzo 23 de 2011

**ACEPTACIÓN:** Mayo 25 2011

**TEMÁTICA:** Gestión Tecnológica

**TIPO DE ARTÍCULO:** Artículo de revisión

**RESUMEN ANALITICO**

Este artículo presenta el estado del arte relacionado con el estándar IEEE802.11 para la conectividad de zonas rurales, obtenido a partir de la revisión de bibliografía y literatura técnica internacional. En primer lugar, se exponen, desde el enfoque de varios autores, los diferentes mecanismos de control de acceso al medio que pueden operar en la capa física establecida dentro del estándar y que permiten el despliegue de redes de largo alcance; posteriormente, se realiza el análisis de cada capa MAC con las principales características de desempeño para el despliegue de redes de áreas extensas. Se describe además el desempeño de la capa física y los límites de distancia posibles para los enlaces de radio considerando la máxima potencia isotrópica radiada equivalente en la banda ISM y el nivel de señal recibida; por último se presentan de manera general los trabajos realizados por algunos de los principales grupos de investigación a nivel internacional relacionados con el tema de desarrollo de redes inalámbricas para emplazamientos rurales en países en desarrollo así como algunas de sus experiencias más importantes.

**PALABRAS CLAVES:** IEEE802.11, Rurales, Control De Acceso Al Medio, Capa Fisica, Red.

**ANALYTICAL SUMMARY**

This article presents the state of the art relating to the IEEE802.11 standard for connectivity in rural areas, obtained from a review of international literature and technical literature. First, set out from the focus of several authors and different mechanisms for medium access control that can operate at the physical layer provided within the standard and allow the deployment of long-range networks. Subsequently, the analysis is performed in MAC layer of the main features of performance for the deployment of wide area networks. It also describes the physical layer performance and potential distance limits for radio links considering the maximum equivalent isotropic radiate power in the ISM band and the received signal level. Finally are generally the work of some of the leading research groups on the topic of developing wireless networks for rural locations in developing countries and some of their most important experiences.

**KEYWORDS:** IEEE802.11, Rural, Media Access Control, Physical Layer, Network.

**INTRODUCCIÓN**

En gran parte de las zonas rurales que hacen parte de los países subdesarrollados se carece de acceso a las TIC (tecnologías de información y la telecomunicación) debido principalmente a factores tales como: el bajo poder adquisitivo de sus habitantes, baja densidad demográfica en estos emplazamientos, la dispersión geográfica de la población, las condiciones topográficas difíciles, las condiciones climáticas severas y el desinterés de los ISP (Internet Service Providers) y los operadores de telefonía celular de ofrecer sus servicios en estas zonas, debido a la lenta amortización de sus inversiones al implementar su infraestructura de comunicación. Esta situación contribuye a que estas regiones se encuentran en algunos casos desprotegidas y marginadas lo cual incentiva el analfabetismo, la carencia de mecanismos que mejoren la salud pública y la insubsistencia de sistemas de prevención remota contra posibles desastres naturales. Si a esto se

suma el aislamiento generado por la carencia de vías terrestres en buen estado que permitan acceder a estos emplazamientos, todos ellos se convierten en factores que disminuyen sustancialmente la calidad de vida y limitan el desarrollo que se pueda dar sobre las comunidades que habitan en estas regiones. Bajo el anterior panorama se necesitan tecnologías de comunicación con buenas prestaciones y de bajo costo, que permitan disminuir la brecha digital o pobreza digital de estos emplazamientos y que a través de las TICs se puedan ofrecer tele-servicios (aplicaciones de correo, comercio electrónico, tele-educación, telemedicina, Voz sobre IP) que permitan contribuir al desarrollo de estas zonas y permita conectarlas con el resto del mundo.[I][II][III][IV][V][VI][VII]

Dentro de las tecnologías de conectividad existentes para el acceso en zonas rurales se tienen las siguientes: HFC (Híbrido Fiber Coaxial Networks), Redes PLC (Power Line Communications), VSAT (Very Small Aperture

Terminal), WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), TETRA (Terrestrial Trunked Radio), CDMA450 (Code Division Multiple Access 450MHz), EV-DO (Evolution-Data Optimized), GPRS (General Packet Radio Service), DECT (Digital Cordless Phone System) y WI-FI (Wireless Fidelity) basada en la familia de estándares IEEE802.11. Cada una de estas tecnologías tiene características que limitan su desempeño en zonas rurales. Entre las características más importantes se encuentran la cobertura, la banda del espectro electromagnético que ocupan, el ancho de banda que soporta, número de estaciones que pueden acceder al canal de comunicación en forma simultánea, el tipo de servicios que puede soportar la red, agregando los costos que se tienen para implementar y desplegar las redes de comunicación. A partir de esta y otras características es posible establecer criterios de decisión para seleccionar la tecnología más apropiada para ofrecer conectividad sobre diferentes emplazamientos rurales. Diversos trabajos previos han identificado Wi-Fi como una de las mejores alternativas. [VIII][IX][X][XI][XII]

Debido a la masificación de equipos Wi-Fi comerciales (Certificados con la familia de estándares IEEE802.11), ésta se presenta como una tecnología de comunicación de bajo costo, que opera en la banda ISM (Industrial, scientific and medical). Además algunos radios Wi-Fi comerciales permiten por firmware/driver o SDR (Software define Radio) realizar modificaciones sobre el control de acceso al medio gracias a los cuales es posible implementar radio enlaces de varios kilómetros. Estas características presentan a esta tecnología de comunicación como una solución para ofrecer conectividad a los emplazamientos rurales. [XIII] [XIV] [XV][XVI][XVII][XVIII][XIX]

Debido a que el estándar IEEE802.11 [XX][XI] fue diseñado y optimizado para redes de área local, durante los últimos años se ha incentivado el desarrollo de investigaciones dirigidas a mejorar y optimizar el desempeño de este estándar sobre redes de área extensa tanto para redes punto a punto, punto multipunto y grilla.

En este artículo se describe el estado del arte del IEEE802.11 para enlaces de largo alcance. Esta descripción se construye a partir de varios enfoques: el primero se centra en modificar algunos parámetros la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa PHY (Physical) definidos en el estándar IEEE802.11 el cual está basado en CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) y describir su desempeño en redes de largo alcance; el segundo presenta los mecanismos para el control de acceso al medio basados en TDMA (Time Division Multiple Access) que mejoran las limitaciones que presenta CSMA/CA en redes de

área extensa; el tercero se presenta el desarrollo de MAC híbridas; el cuarto enfoque se presentan algunas soluciones de productos comerciales inalámbricos para la conectividad de zonas rurales basados en la capa física del IEEE802.11 y que en su capa MAC incorporan protocolos de comunicación propietarios; finalmente, el quinto enfoque describe características de la capa física del IEEE802.11 para redes de área extensa.

## CONTENIDO DEL DOCUMENTO

En la primera sección se presentan las características más importantes del control del acceso básico (MAC) en IEEE802.11 y sus principales deficiencias para implementar redes de largo alcance.

En la segunda sección se describen las modificaciones realizadas al IEEE802.11 CSMA/CA para implementar enlaces de largo alcance, consistente en cambio a los parámetros definidos en la capa MAC y PHY del IEEE802.11 (Cw, Slottime, DIFS, ACKTimeout, AIFSN, Txop) [XXI [XXII] [XXIII] [XXIV] para optimizar el mecanismo de acceso básico en enlaces de largo alcance. También se presentan las técnicas bursting y fastframing [XXIV][XXV] los cuales mejoran el uso del canal de transmisión después que se gana la etapa de contienda esto aumenta considerablemente las prestaciones del IEEE802.11 en redes de largo alcance.

La sección 3 presenta modificaciones del IEEE802.11 sobre TDMA para enlaces de largo alcance. [XXVI] [XXVII] Esta descripción se centra en los protocolos 2P [XIII] [XXVIII], WILDMAC [XXIX], JAZZMAC [XXIX] [XXX], SRAWAN [XXX] los cuales son los fundamentos del draft WiFi-RE (Wireless Fidelity Rural Extension) [XXXII][XXXIII][XXXIV] para el desarrollo de redes Wi-Fi en zonas rurales. Posteriormente se presenta el JALDIMAC [XXXV], protocolo MAC que está diseñado especialmente para los WISPs (Wireless Internet Service Provider). También se presenta MULTIMAC [XXXVI] la cual permite de forma dinámica configurar MAC híbridas entre CSMA/CA, TDMA y otras, y por último se presentan algunas soluciones comerciales que utilizan protocolos propietarios.

En la sección 4 se presentan las características de la capa física del IEEE802.11 para redes de largo alcance, además se presentan mejoras sobre esta capa como el channel bonding para aumentar el ancho de banda del canal de comunicación (De 20MHz a 40MHz) y a su vez el throughput. Además se introducen las técnicas de duplexación TDD (Time division duplex), FDD (Frequency division duplex), para paralelizar transmisiones y aumentar el desempeño de red en estos sistemas de comunicación. [XXXVII] [XXXVIII] [XXXIX]

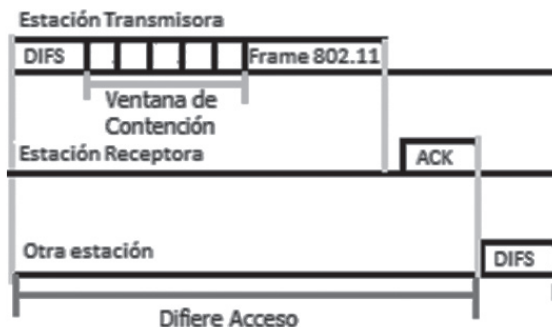
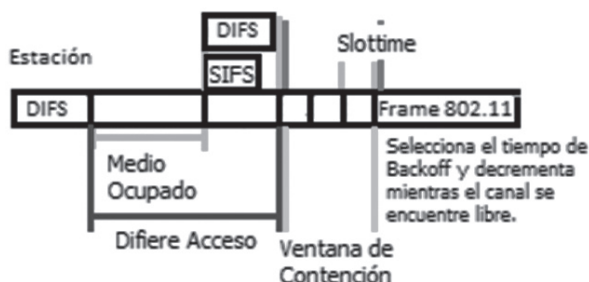
La sección 5 identifica los principales centros de investigación académicos que trabajan en el desarrollo de tecnologías inalámbricas de bajo costo para el despliegue de redes sobre emplazamientos rurales y se presentan algunas experiencias en el despliegue de redes de largo alcance.

## 1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA MAC DEL IEEE802.11

La capa MAC del estándar IEEE802.11 define dos modos para su funcionamiento DCF y PCF. El más implementado sobre los radios comerciales es el distribuido (función de coordinación distribuida DCF) el cual utiliza el protocolo CSMA/CA para coordinar la forma como varias estaciones comparten el acceso el medio. El otro modo centralizado o coordinado (función de coordinación puntual PCF) donde el acceso al medio se ofrece libre de colisiones, su implementación es escasa en radios comerciales por lo tanto no será analizado. [XIX] [XX]

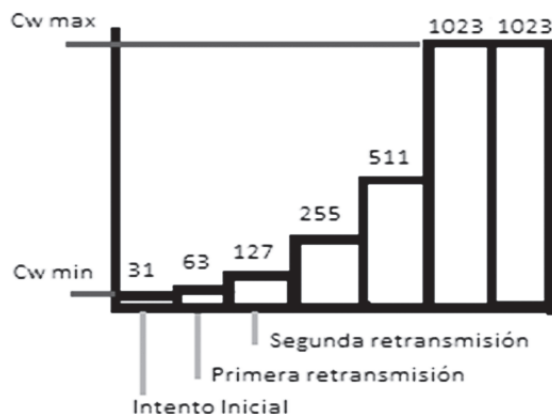
Cuando se utiliza DCF básico la estación transmisora antes de inicializar una transmisión invoca al mecanismo CS (Carrier Sense) para determinar si hay otra estación transmitiendo o si existe una señal Wi-Fi válida. Si la estación encuentra el canal libre por un intervalo de tiempo que excede un espacio DIFS (Distributed Interframe space) o EIFS (Extended Inter Frame Space), lo cual a su vez depende de si la estación estuvo involucrada en una colisión previa, inicia el intervalo de tiempo aleatorio llamado la ventana de contención o backoff el cual se encuentra ranurado. El tamaño de la ventana se va decrementando en uno por cada intervalo de tiempo slottime transcurrido mientras la estación transmisora detecta el canal libre. Cuando el contador de la ranuras llega a cero la estación transmite (la transmisión se realiza al inicializar la ranura del tiempo cero) después la estación espera durante un periodo de tiempo ACKTimeout el arribo de el ACK que confirme que la transmisión sea exitosa, si la estación encuentra el canal ocupado el contador se congela y vuelve a esperar un DIFS, para continuar decrementando el contador. En la figura 1 se presenta el mecanismo de acceso básico al medio. [XIX] [XX]

FIGURA 1. Acceso básico al medio. [XIX] [XX]



La ventana backoff es un entero pseudo aleatorio seleccionado de una distribución uniforme en el intervalo (0, CW) donde CW se llama la ventana de contención cuyo valor depende del número de transmisiones fallidas al enviar un paquete. En el primer intento en que la estación desea transmitir CW toma el valor de  $CW_{min}$  llamado la ventana de contención mínima, cuyo valor en el estándar IEEE802.11b es igual a 32. cada vez que se realiza una transmisión y ésta no es exitosa el valor de CW se dobla, hasta alcanzar el valor máximo  $CW_{max}$ . Cuando alcanza este valor la ventana de contención vuelve a tomar el valor de  $CW_{min}$ . [XIX][XX]

FIGURA 2. Esquema de retransmisión algoritmo backoff IEEE802.11. [XIX][XX]



### 1.1 DEFICIENCIAS DEL IEEE802.11 WLAN PARA REDES DE LARGO ALCANCE

La MAC del IEEE802.11 fue diseñada y optimizada para redes de área local. Los radio enlaces de largo alcance implementados con esta presentan un desempeño deficiente principalmente por tres razones [XXIII]:

- Las colisiones presentes en largas distancias.
- Un mecanismo de recuperación ineficiente.
- Interferencia presente en el enlace.

Además si se le añade la baja utilización de canal que presenta el control de acceso al medio del DCF sobre enlaces de largo alcance se hace necesario modificar parámetros que permitan mejorar sus prestaciones sobre redes de largo alcance. [XXI][XXII][XXIII]

### Las colisiones presentes en largas distancias

El estándar IEEE802.11 cuando se utiliza en enlaces de largo alcance existe la posibilidad de que un nodo comience a transmitir un paquete y las otras estaciones no estén consientes de dicha transmisión por lo tanto estas pueden considerar el canal de comunicación libre y empezar a transmitir generando colisiones. Por lo tanto cuando la distancia entre las estaciones se incrementa (El tiempo en que se demora propagar una onda electromagnética aumenta) la probabilidad de colisionar, retardos y la pérdidas de paquetes se incrementa. [VI][XXI][XXIII]

### Mecanismo de recuperación ineficiente

El estándar IEEE802.11 cuando utiliza el modo DCF cada paquete de manera independiente necesita un ACK, si el paquete es recibido de manera satisfactoria el nodo receptor envía el ACK dentro de un tiempo ACKTimeout, si el ACK no se recibe, el transmisor vuelve a retransmitir el paquete. Cuando la distancia del enlace se incrementa el transmisor tiene que esperar por largo tiempo el arribo de un ACK, lo cual decrementa la utilización del canal, si el periodo de tiempo para que un ACK retorne excede el parámetro ACKtimeout el transmisor puede realizar transmisiones innecesarias que pueden colisionar con ACK provenientes de estaciones receptoras y así desperdicia el ancho de banda. [XXI][XXIII][XXVII]

### Interferencia presente en el enlace

Una de las fuentes principales de error en un enlace basado del IEEE802.11 es la interferencia generada por enlaces de comunicación que operan en el mismo canal o están presentes en canales adyacentes y la presencia de señales Wi-Fi no válidas. En un enlace de largo alcance la interferencia se convierte en un aspecto crítico para el mecanismo CSMA/CA debido a que cuando una estación va a transmitir ésta no puede detectar la interferencia presente en el otro extremo donde se encuentra el nodo de comunicación debido a la distancia presente entre las estaciones por lo tanto el número de colisiones aumenta considerablemente y el desempeño de la red se convierte crítico. [XXI][XXIII][XXVII]

Esta interferencia ocurre en algunos casos porque las antenas direccionales tienen lóbulos laterales con buena ganancia. Además por el uso de radios con alta potencia se deteriora la recepción de los paquetes recibidos por

los otros radios, el FER (Frame error rate) se incrementa y el desempeño de red disminuye considerablemente. También cuando se realizan transmisiones simultáneas desde varios radios, cada uno detecta el canal como ocupado debido a la presencia de una señal Wi-Fi válida difiriendo las transmisiones. [XXI][XXIII][XXVII]

## 2. MODIFICACIONES IEEE802.11 CSMA/CA PARA ENLACES DE LARGO ALCANCE

Dentro de los parámetros que inciden sobre el desempeño del IEEE802.11, sobre redes de largo alcance se encuentran el Slottime y el ACKTimeout.

### Modificaciones definidas en el estándar

En la última revisión del 2007 del estándar IEEE802.11 se especifica el uso de esta tecnología para redes metropolitanas, en donde se realizan consideraciones sobre la potencia de transmisión y donde modifica el valor Slottime a dos veces el tiempo de propagación entre las dos estaciones a partir del parámetro Coverage Class, el cual permite implementar enlaces sobre distancias hasta 15Km.[XX][XXI]

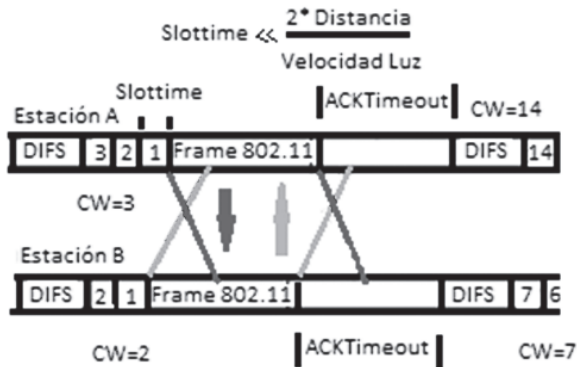
### Modificaciones definidas para el DIFS, Slottime y el ACKTimeout

**DIFS:** Es el tiempo que debe esperar una estación una vez que detecta que el canal ha quedado libre para que comenzar el periodo de contención. Si este valor tiempo no se incrementa con la distancia incrementa la probabilidad de colisione debido al tiempo que se tarda en propagarse la onda electromagnética entre las estaciones. Este valor debe ser mayor a dos veces el tiempo de propagación para garantizar que la estación pueda escuchar la transmisión de otra. [IV][VI][XX][XXI][XXII]

**Slottime:** Está definido dentro del estándar de tal forma que una estación siempre pueda determinar si otra estación ha accedido al medio al inicializarse un slot previo. El tiempo de duración para el Slottime debe garantizar que éste no puede finalizar antes de que la señal alcance su destino. Este parámetro incide sobre la probabilidad de que las estaciones colisionen cuando estas deseen acceder al medio de forma simultánea, la probabilidad de colisión aumenta con la distancia de forma proporcional al número de Slottime(s) que logren inicializarse antes de que la estación logre determinar si el canal se encuentra ocupado por la transmisión de otra estación. Cuando se selecciona el valor Slottime definido en el estándar (20µs) aumenta la probabilidad de colisión al incrementar la distancia entre las estaciones por lo tanto aumenta la cantidad de paquetes perdidos, el throughput disminuye y los

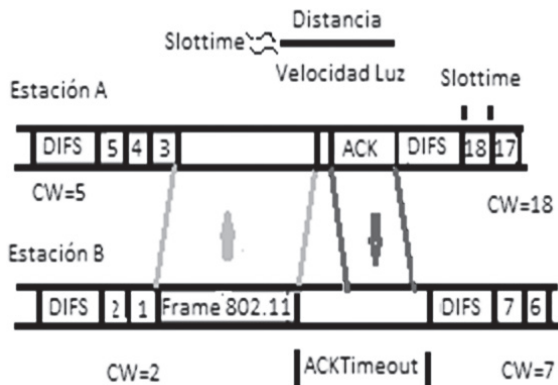
retardos aumentan. Si el Slottime es proporcional a la distancia entre las estaciones se optimiza el throughput, aumenta los retardos y disminuye la probabilidad de colisión. A medida que el Slottime se aproxima a dos veces el tiempo de propagación, el throughput, los retardos y la cantidad de paquetes perdidos disminuye. A continuación se presenta cada uno de los estados. [IV] [VI] [XX] [XXI] [XXII]

**FIGURA 3.** El valor del Slottime es menor que el tiempo de propagación



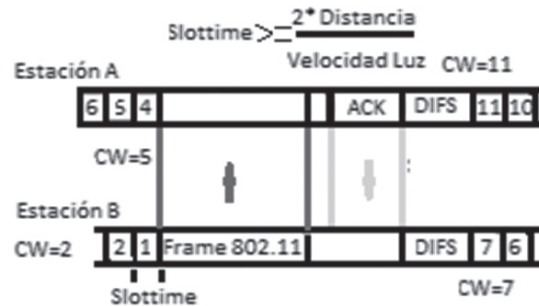
Fuente: Adaptado por los autores de [VI] [XXI] [XXII]

**FIGURA 4.** El valor del Slottime es cercano al tiempo de propagación.



Fuente: Adaptado por los autores de [VI] [XXI] [XXII]

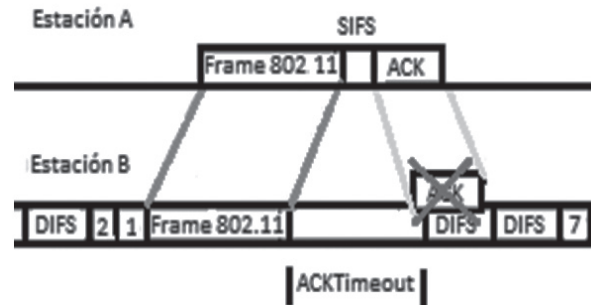
**FIGURA 5.** El valor del Slottime es mayor a dos tiempo de propagación.



Fuente: Adaptado por los autores de [VI] [XXI] [XXII]

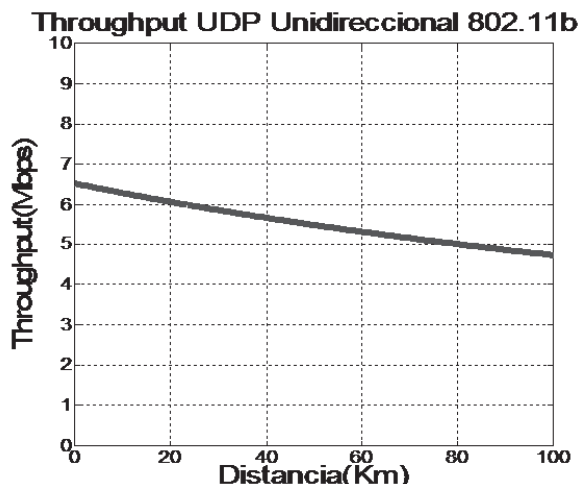
**ACKTimeout:** Define el tiempo que la estación transmisora debe esperar el arribo de un ACK paquete de confirmación para asegurar su arribo a la estación receptora, este valor debe estar cercano a dos veces el tiempo propagación para evitar retransmisiones debido a que este parámetro innecesarias. [II] [IV] [VI][XXI] [XXII][XXIII] [XXVII][XL][XLI]

**FIGURA 6.** El valor ACKTimeout expira y se genera una retransmisión innecesaria

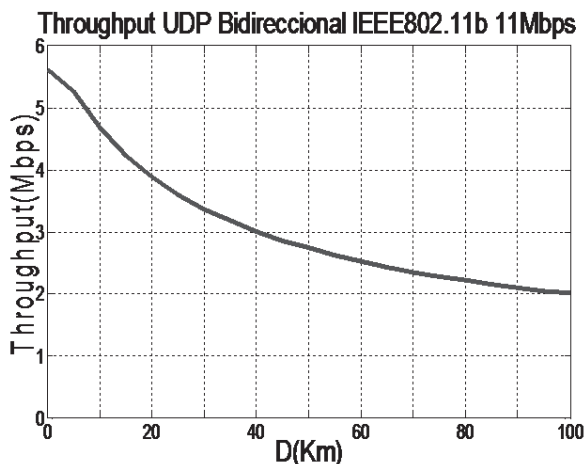


Fuente: Adaptado por los autores de [VI] [XXI] [XXII]

A continuación en la figura 7 se presenta el desempeño del throughput UDP unidireccional en un enlace punto a punto IEEE802.11 considerando el modelo de una transacción de un paquete UDP unidireccional, teniendo presente el tiempo de propagación entre las estaciones y las siguientes condiciones: velocidad de transmisión de 11Mbps, el Slottime (20us), DIFS (50us), SIFS (10us) y considerando el canal de comunicación ideal es decir el frame error rate igual a cero, MTU (Maximun transmission unit) de 1480 bytes, el ACKTimeout se configura en dos veces el tiempo de propagación que existe entre las estaciones para evitar retransmisiones. [VI] [XXI] [XXVII] [XLII]

**FIGURA 7.** Throughput UDP unidireccional 11Mbps.

En la figura 8 se presenta el throughput UDP saturado Bidireccional para un enlace punto a punto a 11Mbps calculado con el modelo de JSimo considerando las condiciones expresadas anteriormente excepto una MTU de 1000bytes. Se puede apreciar como al aumentar la distancia en el rango de 0-100Km la probabilidad de colisión se incrementa generando retransmisiones y decrementando el throughput efectivo. La contribución para el caudal de datos transmitido por cada estación presenta tiene la característica de presentar asimetría. [VI] [XXI] [XXVII]

**FIGURA 8.** Throughput UDP Bidireccional CSMA/CA a 11Mbps

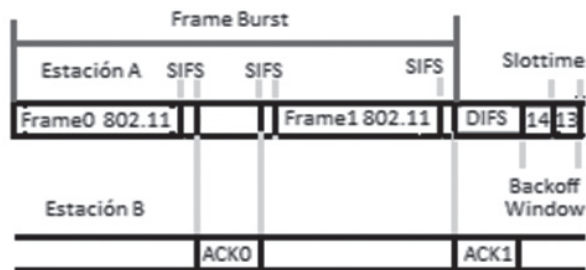
Cuando se utiliza el estándar IEEE802.11e basado en EDCF (Enhance Distributed Coordinate Function) se introducen nuevos parámetros que mejoran sustancialmente el control de acceso mecanismo de acceso. Estos parámetros son CW (Contention Window), TXOP (Transmission Opportunity), AIFS (Arbitrary interframe Space). Los parámetros CW y AIFS inciden sobre la probabilidad de colisión cuando las dos estaciones que comparten el medio quieren transmitir de forma simultánea. El parámetro TXOP permite el envío de una o más MPDU (MAC Protocol Data Unit) las cuales eventualmente pertenecerán a diferentes MSDU (MAC Service Data Unit) sin entrar en la etapa de contienda. El estándar IEEE802.11e presenta a EDCF como una evolución de DCF dentro del estándar esta soporta 4 AC (Access Category), BK (Background), BE (Best effort), VO (Voice), VI (Video) cada una tiene una probabilidad de acceder al canal sobre la capa MAC. La categoría de acceso  $i^{\text{th}}$  tiene su propia cola en la transmisión caracterizada por los parámetros: AIFSN $_i$ ,  $C_{\text{wmin},i}$  y TXOP $_i$ , esto permite introducir QoS (Quality of service) en el estándar IEEE802.11. Otro parámetro que se incluyen en la EDCA son los ACK en bloque los cuales se utilizan para ocupar el canal de una forma más eficiente debido a que reduce el arribo de ACKs individuales después de cada transmisión de paquete y disminuye el número de retransmisiones, esto se considera cuando varios paquetes son enviados en bloque separados por un SIFS y la estación receptora envía un reconocimiento llamado bloque ACK por el arribo de estos. [XXII] [XXIV]

Una de las limitantes del estándar IEEE802.11 es su baja utilización del canal basado en el draft del IEEE802.11e se desarrolló la técnica bursting y la técnica fast frames las cuales buscan optimizar el uso del canal de transmisión que presenta CSMA/CA, después de haber ganado la etapa de contienda. Esto es fundamental en enlaces de comunicación de largo alcance. [XXII][XXIV] [XXV]

El bursting reduce el uso recurrente del algoritmo backoff y permite así transmitir varios paquetes de forma consecutiva separados por un SIFS sin ejecutar el algoritmo de parada y espera descrito en el acceso básico. El fastframing permite agregar frames incrementando el tamaño de la MTU (Maximum Transmission Unit) y a su vez que la estación transmita mas información después de ganar la etapa de contienda. Esto permite utilizar el canal de comunicación de una manera más eficiente y mejora el desempeño sobre enlaces de decenas de kilómetros. [XXII][XXV]

En la figura 9 se presenta el dibujo de una transmisión frame Burst utilizando el estándar IEEE802.11e.

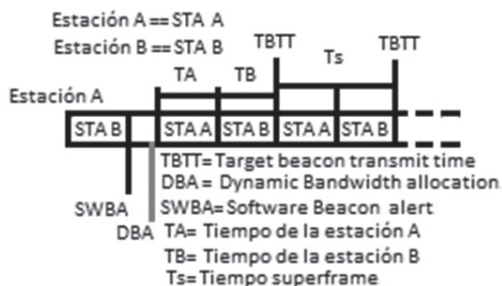
**FIGURA 9.** Frame Burst estándar IEEE802.11e



**3. IEEE802.11 (PHY) CON TDMA (MAC) PARA ENLACES DE LARGO ALCANCE**

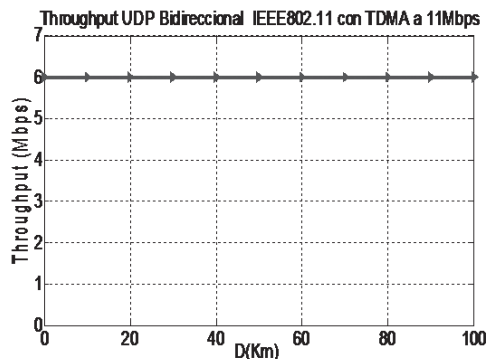
Debido al desempeño que presenta CSMA/CA en presencia de interferencia y la baja utilización de canal que presenta el algoritmo DCF para enlaces de largo alcance se definen mecanismos de acceso al medio basados en TDMA, los cuales mejoran el control de acceso al canal de transmisión. Este mecanismo evita las colisiones que presenta el mecanismo de acceso básico del IEEE802.11 y también permite operar de una forma más eficiente en presencia de interferencias debido a que las estaciones no pueden percibir que el canal de transmisión se encuentre ocupado en el área circundante del nodo receptor. Además al utilizar TDMA se puede garantizar una optimización en el uso del canal de transmisión, aunque puede incrementar la latencia entre los paquetes y aumentar el desperdicio del ancho de banda, debido a que las estaciones solamente pueden transmitir en un determinado slot. Para disminuir los retardos se utilizan slots cortos y para aumentar la utilización del canal se incluyen slots dinámicos que se construyen a partir de cabeceras más complejas. Todos estos aspectos conllevan a que TDMA utilice una compensación entre el throughput y los retardos de acuerdo a las necesidades de cada aplicación. Cuando se utiliza TDMA se debe tener un protocolo que permita asignar Slots y un algoritmo de sincronización para evitar las colisiones por relojes asíncronos.[XXVI] [XXVII]

**FIGURA 10.** Diagrama configuración TDMA [XXVI]



A continuación en la figura 11 se presenta el throughput UDP Bidireccional en un enlace punto a punto utilizando la capa física definida en el estándar IEEE802.11b a 11Mbps y la capa MAC basada en TDMA.

**FIGURA 11.** Throughput UDP Bidireccional TDMA a 11Mbps.[XXIII]



El primer mecanismo de acceso al medio basado en la división en tiempo fue el protocolo 2P, donde cada estación cambia de un estado transmisión a un estado de recepción cada cierto tiempo después de transmitir cierta cantidad de bytes. Los ACK son enviados cuando se conmuta entre el estado recepción-transmisión. Este protocolo mejora algunas deficiencias que presenta CSMA/CA, pero tiene ineficiencias como la baja utilización de canal, también limita su throughput por utilizar slots fijos y tiene mal desempeño en canales con muchas fluctuaciones.[XIII] [XXVIII]

Para mejorar las prestaciones que presenta 2P en presencia de interferencias se diseña WILDMAC (Wireless Long Distance MAC) la cual optimiza el mecanismo de recuperación y la utilización de canal realizando bulk ACK, se encuentra libre de colisiones debido a la sincronización presente en sus enlaces de comunicación. Tiene corrección de errores utilizando un sistema de FEC (Forward error correction), además implementa mecanismos de retransmisiones para evitar pérdidas en los paquetes. [XXVII][XXIX][XLII]

Identificando algunas falencias presentes en 2P y WILDMAC se diseñó JazzyMAC (An Adaptive, High Performance MAC for Long-Distance Multihop Wireless) [XX][XXI][XLIII] el cual pretende alcanzar un throughput óptimo sobre redes AD-HOC, utilizando slots de longitud dinámica a partir del estado local de la red y la información del tráfico observado este protocolo permite realizar una compensación entre los retardos y el throughput, no tiene limitaciones con la topología de red implementada.[XXIX] [XXX]



Considerando la necesidad de establecer servicios multimedia (Video y VoIp) sobre redes de largo alcance se debe establecer el control de acceso al medio SWRAWAN (Sectorized Rural Area Wireless Access Network), el cual permite ofrecer calidad de servicio QoS entre los enlaces de comunicación, utilizando algoritmos de Round Robin con la priorización de las colas. Este protocolo permite resolver el problema de nodos ocultos y mejora sustancialmente la utilización del canal de comunicación, reduce las cabeceras, permite obtener throughput sobre UDP de 42Mbps con 54Mbps y de 7.92Mbps con 11Mbps.[XXXI]

Teniendo presente la necesidad de ofrecer conectividad sobre zonas rurales usualmente con baja densidad demográfica y la necesidad de establecer enlaces de comunicación de largo alcance con buenas prestaciones y con base en los mecanismos de acceso al medio WILDMAC y JAZZMAC, se presenta el draft WIFIRE como un nuevo estándar para definir la construcción de radios de comunicación que permitan el despliegue de redes en emplazamientos rurales. Dentro del draft se especifican tres tipos de redes punto-punto, punto-multipunto, redes tipo malla (AD-HOC) y se permite definir un celular como un nodo terminal. En la definición para el control de acceso al medio incorpora un direccionamiento de complejas interacciones en presencia de interferencias, adaptabilidad en enlaces con altas pérdidas, reasignación de canal de forma inteligente, adaptabilidad a las fluctuaciones en las demandas de tráfico y la robustez en la red. [32][33] [34]

Considerando los elevados costos que incurren los WISP en el despliegue de redes inalámbricas rurales, los cuales principalmente se le atribuyen a la infraestructura necesaria para instalar los sistemas de comunicación. Además la baja densidad demográfica presente en estos emplazamiento y su bajo nivel adquisitivo lo cual genera una limitante en la tasa de retorno de las inversiones, se presenta el mecanismo de control de acceso al medio JaldiMAC (Jaldi es la palabra Hindu de fast/quick) el cual propone utilizar una topología de red punto a multipunto que toma ventaja de la orografía del terreno como son las torres naturales (montañas, cimas) para ofrecer conectividad en enlaces de comunicación de largo alcance sus principales características es la introducción de un layout dinámico que optimiza el desempeño en enlaces punto a multipunto, se adapta a la asimetría del tráfico de internet, provee perder la pérdida de QoS garantizando tráfico sensible a latencia. [35]

En las redes de comunicación inalámbricas existen periodos de contienda bajos donde CSMA/CA es más eficiente y en periodos de alta contienda TDMA presenta mejores prestaciones, con estas premisas se presenta MultiMAC) la cual consiste en el desarrollo de

una capa MAC híbridas en la cual se permite mejorar el desempeño de los enlaces de comunicación dentro de diferentes condiciones de red, para el desarrollo de MultiMAC se incorporaron procesos de decisión que se le incorporan en la MAC de acuerdo a las características del nodo de comunicación o las estadísticas de flujo de datos dentro de la red.[XXXVI]

### Protocolos MAC propietarios

En el mercado existen múltiples fabricantes de radios con protocolos propietarios para el despliegue de redes inalámbricas de largo alcance. Entre ellos se encuentran los Motorola Canopy [XLIII], Lobometrics [XLIV], Alvarion [XLV], así como su línea Wi-Fi para exteriores como Terabeam [XLVI], Mikrotik [XLVII], Ubiquiti networks [XLVIII], sus mejoras establecidas se basan en las técnicas de control de acceso al medio TDMA y CSMA/CA.

## 4. MEJORAS EN LA CAPA FÍSICA DEL IEEE802.11 PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ENLACES DE LARGO ALCANCE

### Generalidades de la capa física IEEE802.11

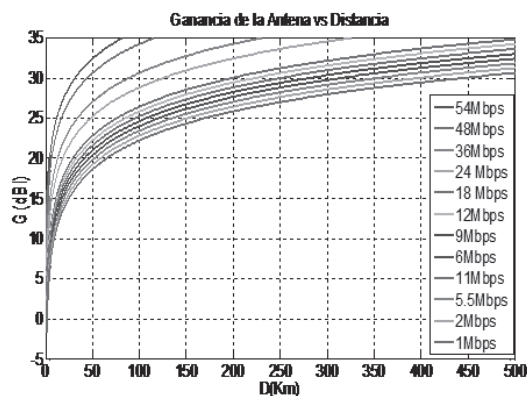
En el estándar IEEE802.11b en la capa física se utiliza la modulación de espectro ensanchado por secuencia directa de alta tasa HR/DSSS, mientras que para el estándar IEEE 802.11g se utiliza la tecnología la tasa extensiva en multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM. Cada tipo de modulación (DBPSK, DQPSK, CCK, BPSK, QPSK, 64-QAM) define una velocidad de transmisión (1, 2, 5.5, 11, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps) y el umbral de nivel de recepción para el cual BER (Bit error rate) es menor a  $1e-5$ , considerando el canal libre de interferencias y un umbral de ruido cercano al térmico.[20] Una de las principales características del BER es que no depende de la distancia presente entre los nodos de comunicación si no la relación señal a ruido. Además la dependencia FER sobre la relación señal a ruido es cercano a su valor teórico. [XLIX][L][LI]

### Límites de la distancia máxima para la capa física.

Los límites de distancia que impone la capa física dependen de la máxima PIRE (Potencia isotrópica irradiada equivalente) y del nivel de recepción de los radios que hacen parte del enlace de comunicación. La PIRE obedece la regulación que adopta cada país. Los principales entes reguladores en el mundo por regiones son: FCC (Federal Communications Commission) en

EEUU, ETSI (European Standards Institute) EUROPA, MPT (Ministry of Post and Telecommunication) JAPON.[VI] A continuación en la figura 12 se presenta los límites de distancia en función de la ganancia de las antenas para un enlace punto a punto en la banda 2.4GHz considerando la regulación FCC 15.247. Para el cálculo de las pérdidas por propagación se considero el modelo de Friis con margen de desvanecimiento de 20dB y el umbral de recepción se tomó de las especificaciones del radio XR2 [XLVIII] para cada una de las velocidades de transmisión definidas para el estándar IEEE802.11b/g. [VI][XXI]

**FIGURA 12.** Límites de la capa física en función de la ganancia.



### Mejoras a la capa física IEEE802.11

Para mejorar las prestaciones de throughput y el rango de distancia en los enlaces punto a punto de largo alcance utilizando las capas MAC basadas en CSMA/CA y TDMA, se aumenta el ancho de canal de transmisión hasta 40MHz, se utilizan las técnicas MIMO (Multiple Input/ Multiple output) las cuales están definidas en la capa física del IEEE802.11n [38] para aumentar las velocidades de transmisión hasta 600Mbps. Además se pueden realizar mejoras utilizando antenas altamente directivas con ganancia, utilizar técnicas de channel bonding utilizando duplexación TDD (Time division duplex) o FDD (Frecuency división dúplex) permitiendo transmitir y recibir de forma simultánea buscando optimizar el uso del canal de comunicación. [XXXVII] [XXXVIII][XXXIX]

## 5. GRUPOS DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO DE REDES INALÁMBRICAS RURALES

Existen importantes esfuerzos encaminados al estudio de las técnicas de mejoramiento de los estándares IEEE

802.11 con el propósito de optimizar la comunicación de largo alcance en enlaces WiFi. Se presenta a continuación algunos de los grupos de investigación dedicadas a estas tareas.

El grupo de investigación Ixem Labs de la universidad de Torino desarrolló sistemas de comunicación inalámbrica de bajo costo que reportan throughput de 25, 40 y 75Mbps a una distancia 100Km y 8, 12 y 24Mbps a 300Km, utilizando, un radio, 2 bonded y 4 bonded radios. Las mejoras de canal se realizan utilizando duplexación TDD y FDD. [LII]

El GTR-UPCP (Grupo de telecomunicaciones Rurales-Universidad Pontificia Católica del Peru) con apoyo de la fundación EHAS (Enlace hispano de la salud) y la colaboración de la UPM (universidad politécnica de Madrid) desarrollan proyectos de conectividad para ofrecer servicios de telemedicina en el Peru, Colombia, Ecuador, Cuba utilizando radios IEEE802.11.[LIII]

El grupo TIER (Technology and infrastructure for emerging regions) de la Universidad de Berkeley presenta TDMA como mecanismo de acceso al medio que mejora sustancialmente las limitantes que presenta CSMA/CA. Ellos desarrollaron proyectos en Aravid y en Ghana donde lograron establecer enlaces de comunicación de 6Mbps sobre TCP hasta distancias de 65Km. Además con la capa MAC que desarrollaron lograron establecer un enlace punto a punto de 382Km en Venezuela donde obtuvieron un throughput de 6Mbps. [LIV]

El grupo SynerG (Systems and Networks Research group) hizo parte del desarrollo del draft WIFIRE para la conectividad de zonas rurales en la India. [55]

El grupo WAND (Networks Research Group), trabaja en Nueva Zelanda en el desarrollo de hardware de bajo costo para la conectividad en zonas rurales. [56]

## 6. CONCLUSIONES

La masificación de dispositivos inalámbricos WiFi comerciales y su bajo costo han permitido que esta tecnología se considere como una alternativa para su uso en zonas apartadas.

Mediante mejoras en las técnicas de control de acceso al medio es posible que el estándar IEEE 802.11 pueda utilizarse para el despliegue de redes inalámbricas en entornos rurales con buenas prestaciones.

La reprogramación del firmware de los radios WiFi comerciales, permite ajustar parámetros de la capa física y la capa MAC, tales como: Cw, Slottime, DIFS, ACKtimeout, AIFSN y TXop de manera que es posible

optimizar los mecanismos de acceso en enlaces de largo alcance.

Las técnicas de Bursting y Fastframing mejoran el uso del canal de transmisión después que se gana la etapa de contienda, lo cual aumenta considerablemente las prestaciones del estándar IEEE 802.11 en redes de largo alcance.

Los mecanismos de acceso al medio basados en TDMA ofrecen mejores prestaciones para enlaces de largo alcance, sin embargo en distancias de pocos kilómetros y en entornos libres de interferencia CSMA/CA presenta buenas prestaciones.

Se destacan sistemas desarrollados como: WILDMAC, JazzyMAC, SWRAWAN, WIFIRE, JaldiMAC, los cuales han logrado mejoras importantes en la optimización en el mecanismo de acceso al medio del estándar IEEE802.11 y cuyos resultados se espera que se incluyan en nuevos diseños de radios con tecnología WiFi de uso comercial.

Se describió los límites, el desempeño y las mejoras de la capa física del IEEE802.11 para el despliegue d en redes de áreas extensa.

En la literatura revisada no se han encontrado publicaciones que describan el desempeño del estándar IEEE802.11n para redes de largo alcance; sin embargo algunos investigadores describen que en sus pruebas preliminares tienen excelentes prestaciones.

## 7. REFERENCIAS

- [I] GALPERIN, Hernan. Wireless networks and rural development: Opportunities for Latin America. Information technologies and international development, vol 2, No 3, p. 47-56, Spring, Boston: The Massachusetts Institute of technologies, 2005.
- [II] CAMACHO, Luis, QUISPE, River, CÓRDOVA, César, LEOPOLDO, Liñán, CHÁVEZ. Wild: Wifi based Long Distance. Lima, Pontificia Universidad Católica del Peru, 2009, 180 p.
- [III] SONESH, Surana, Designing Sustainable Rural Wireless Networks for Developing Regions, Trabajo de grado (PhD filosofía en ciencia de la computación), Universidad de California, Berkeley ,2009.
- [IV] ARAUJO, Gerson, CAMACHO, Luis, CHÁVEZ David, CÓRDOVA, César, ESPINOZA David, HONDA Renato, LIÑÁN Leopoldo, MARGARITO, Jesús, MARTÍNEZ Andrés, MAYA, Eva Juliana, OSUNA Pablo, CHECO Yuri Pa-, PACO Juan, QUIJANDRIA Yvanna, QUISPE River, REY Carlos, SALMERÓN Sandra, SÁNCHEZ Arnau, SANONI, Paola, SEOANE Joaquín, SIMÓ, Javier y VERA Jaime. Redes inalámbricas para zonas rurales, Lima, Pontificia Universidad Católica del Peru Enero 2008, 252 p.
- [V] UBARAQ MISHRA, Shirdhar, HWANG, John, FILIPPINI, DicK, MOAZZAMI Reza, SUBRAMANIAN Lakshminarayanan y DU Tom. Economic Analysis of Networking Technologies for Rural Developing Regions. In 1st Workshop on Internet and Network Economics, 2005.
- [VI] SIMÓ, Francisco Javier. Modelado y Optimización de IEEE802.11 para su Aplicación en el Despliegue de Redes Extensas en Zonas rurales aisladas de Países en Desarrollo. Trabajo de grado (Doctor en ingeniería de telecomunicación). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela superior de ingenieros de telecomunicación, Departamento de Ingeniería y Sistemas Telemáticos 2007.
- [VII] GORP, Van and CHRIS, Morris. "Rural Connectivity Through WiFi: Regulatory Challenges and Opportunities in Southern Africa, paper presented at the annual meeting of the International Communication Association, San Francisco, 2007.
- [VIII] GÓMEZ OVIEDO, Pablo Valentin, Análisis de sistemas digitales radio apropiados a las necesidades de telecomunicación en zonas rurales aisladas de la Amazonia peruana, Trabajo de grado (Ingeniero de Telecomunicaciones) ,Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- [IX] BREWER, Eric A, Technology Insights for Rural Connectivity, Congreso: workshop Wireless Communication And Development: A Global Perspective, UC Berkeley, Intel Research Berkeley, 2005.
- [X] GUNASEKARAN, Vinoth, HARMANTZIS, Fotios C .Emerging wireless technologies for developing countries, Technology in Society, Vol. 29, No. 1. p. 23-42, 2007.
- [XI] NEDEVSKI, Sergiu, SURANA, Sonesh, DU, Bowei, PATRA, Rabin, BREWER, Eric, STAN, Victor, TELEMOVIL, Zapp, Potential of CDMA450 for rural network connectivity,

- Communications Magazine, IEEE , vol.45, no.1, p.128-135, 2007.
- [XII] PÉREZ BENÍTEZ, Germán, Guía de tecnologías de conectividad para acceso en áreas rurales. Unión internacional de telecomunicaciones, Oficina de desarrollo de las telecomunicaciones, 2007,84p.
- [XIII] RAMAN, Bhaskaran, CHEBROLU, Kameswari, Experiences in Using WiFi for Rural Internet in India, IEEE Communications Magazine, 45 (1), , 104-110 p, January 2007.
- [XIV] LYONS, Jhon, Redes Inalámbricas para países en desarrollo, una guía práctica para planificar y construir redes inalámbricas de bajo costo, 2008, 398 p.
- [XV] CHAMORRO, Lilian y PIETROSEMOLI, Ermanno, Redes inalámbricas para el desarrollo en América Latina y el Caribe. APC Temas Emergentes, Montevideo 2008.
- [XVI] FLICKENGER, Rob, OKAY, Steve, PIETROSEMOLI, Ermanno, Marco Zennaro, and Carlo Fonda. Very long distance wi-fi networks. In Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networked systems for developing regions. ACM, p. 1-6, New York, 5, 2008.
- [XVII] KRUSHANCHANDRA PATRA, Rabin. Multi-Tier Network Architecture for Long Distance Rural Wireless Networks in Developing Regions. California, 2009, Trabajo de grado (Ph.D en filosofía en ciencias de las computación). University of California at Berkeley, Berkeley, Electrical Engineering and Computer Science.
- [XVIII] TRINCHERO, Daniele, GALARDINI, Alessandro, Stefanelli, Riccardo, FIORELLI, Benedetta, CAMBIOTTI, Fluvio. MKM networks: a solution for low cost, long distance radiocommunications, Ixem Labs, Electronics Department, Politecnico di Torino, c.so Duca degli Abruzzi 24, Torino, Italy.
- [XIX] IEEE 802.11g-2003 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 - Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band (2003).
- [XX] I. 802.11-2007, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Rev. 2007, technical report, IEEE CS, 2007.
- [XXI] F. J. Simo Reigadas, A. Martínez Fernández, F. J. Ramos-López, J. Seoane-Pascual, Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links", IEEE Transactions on Mobile Computing, p. 15, vol. 9, No. 6, 2010.
- [XXII] NTUTUMU, Sandra Salmerón, Parametrización de IEEE 802.11e EDCA para la priorización del tráfico VoIP en redes extensas para zonas rurales de países en vías de desarrollo, Madrid, 2007, 21, trabajo de grado Master, Universidad Rey Juan Carlos, ETSI de Telecomunicación.
- [XXIII] NTUTUMU, Sandra Salmero, REIGADAS, Javier Simó y PATRA Rabin, Comparison of MAC protocols for 802.11-based long distance networks, Congreso: Workshop Wireless For Development WIRELESS4D, Karlstad, Sweden, 2008.
- [XXIV] IEEE 802.11e2005, IEEE Standard for Information Technology Medium Access Method (MAC) Quality of Service Enhancements, November 2005.
- [XXV] Atheros Communication Super G Maximizing Wireless performance, Going to distance, White paper, 2004.
- [XXVI] LEFFLER, Sam, TDMA for Long Distance Wireless Networks, University of Cambridge, Computer Laboratory Seminar, 2009.
- [XXVII] PATRA Rabin, NEDEVSCHI Sergiu, SURANA, Sonesh, SHETH, Anmol, SUBRAMANIAN ,Lakshminarayanan, Eric. Brewer. WiLDNet: Design and Implementation of High Performance WiFi Based Long Distance Networks, TIER Group, Universidad de California Berkeley, Universidad de Colorado, Universidad de Nueva York, Boulder, 2007.
- [XXVIII] RAMAN, Bhaskaran, CHEBROLU, Kameswari, Design and Evaluation of a new MAC Protocol for Long Distance 802.11 Mesh Networks. Department of CSE, Department of EE, IIT Kanpur, Mobile and ubiquitous Computing Seminar, Spring 2006.

- [XXIX] SUBRAMANIAN, Lakshminarayanan. A Low-Cost Efficient Wireless Architecture for Rural Network Connectivity, Computer Science Department Room 706, 715 Broadway. 2009. 19p.
- [XXX] PATRA Rabin, NEDEVSCHI Sergiu, SURANA, Sonesh, SHETH, Anmol, SUBRAMANIAN, Lakshminarayanan, BREWER, Eric. RATNASAMY, Sylvia. An Adaptive, High Performance MAC for Long-Distance Multihop Wireless Networks. California, EECS Department, Intel Research, UC Berkeley, 2008. 12p.
- [XXXI] PULI, Narasimha Reddy, The SRAWAN MAC Protocol to support Real-Time Services in Long Distance 802.11 Networks, 2006, p.58, trabajo de grado (Maestría), Department of Computer Science & Engineering Indian Institute of Technology, Kampur.
- [XXXII] PAUL, Krishna, VARGUESE, Anitha, IYER, Sridhar, RAMAMURTHI, Bhaskar, KUMAR Anurag, WiFiRe: Rural Area Broadband Access Using the WiFi PHY and a Multisector TDD MAC, New Directions in networking technologies in emerging economies, 2007.
- [XXXIII] Broadband Wireless for Rural Areas -- WiFiRe: Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Center of excellence in Wireless Technology (CEWIT).
- [XXXIV] KURKURE, Sameer y HULLUR, Shravan Kumar WiFiRe: Wireless broadband access for rural area, Second Stage Report, trabajo de grado (Master of technology), 2007, 16, Kanwal Rekhi School of Information Technology. Indian Institute of Technology, Powai, Mumba.
- [XXXV] YAHEL Ben-David, MATTIAS Vallentin, Seth Fowler, and Eric Brewer. JaldiMAC: taking the distance further. In Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions (NSDR '10). ACM, USA, New York, Article 2, 2010, 6 pages.
- [XXXVI] DOERR, Christian, NEUFELD Michael, FIFIELD, Jeff, WEINGART, Troy, SICKER, Douglas y GRUNWALD Dirk C. Doerr. MultiMAC- An Adaptive MAC Framework for dynamic Radio Networking, Department of Computer Science, University of Colorado Boulder. Computer Science Department Room 706, 715 Broadway, 2005.
- [XXXVII] TRINCHERO, Daniele, GALARDINI, Alessandro Stefanelli, Riccardo, FIORELLI, Benedetta, CAMBIOTTI, Fluvio, Reliability and scalability analysis of Low cost long distance IP-Based wireless networks, innovations for digital inclusion ITU-T Kaleidoscope event, Mar del plata, 2009.
- [XXXVIII] TRINCHERO, Daniele, GALARDINI, Alessandro Stefanelli, Riccardo, FIORELLI, Benedetta, VENUTI Piergiorgi, Performance of Low Cost Radios in the Implementation of Long Distance Wireless Links, iXem Labs, Politecnico di Torino, Italy, 2008.
- [XXXIX] TRINCHERO, Daniele, GALARDINI, Alessandro Stefanelli, Riccardo, FIORELLI, Benedetta, CAMBIOTTI, Fluvio, An independent, Low Cost and Open Source Solution for the realization of wireless links over huge multikilometric Distance, p.495-498, IEEE Radio and Wireless Symposium, 2008.
- [XL] SIMO REIGADAS, Francisco Javier, FERNÁNDEZ Andres, Martínez, DULCEY DURAN, Maria Fernanda, GALLÓN, RENDON, Álvaro, Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas, Departamento Teoría de la señal y Comunicaciones Universidad Rey Juan Carlos España, Grupo de ingeniería Telemática Universidad del Cauca Colombia. 2003.
- [XLI] GOMEZ OVIEDO, Pablo Valentin, Diseño e implementación de una red inalámbrica IEEE 802.11b para aplicaciones de voz y datos en la cuenca del río Napo Perú, p. 80, 2007, Tesis de grado (Ingeniero de Telecomunicaciones), Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona.
- [XLII] SHETH, Anmol, NEDEVSCHI, Sergiu, PATRA, Rabin, SURANA, Sonesh, BREWER, Eric, SUBRAMANIAN, Lakshminarayanan. Packet Loss Characterization in WiFi-based Long Distance Networks, Universidad de California Berkeley, Universidad de Colorado, Universidad de nueva york, IEEE INFOCOM, 2007, pp 312-320.
- [XLIII] Motorola soluciones de redes inalámbricas para gobiernos, empresas, WISP, (online), Citado en abril 2011, Disponible en: <http://motorola.wirelessbroadbandsupport.com/support/> >.

- [XLIV] Lobometrics compañía que manufactura dispositivos inalámbricos, citado en abril 2011. Disponible en: <[http://www.lobometrics.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=81&Itemid=55](http://www.lobometrics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=55)>
- [XLV] Alvarion Soluciones de comunicación inalámbricas 4G. citado en abril 2011, Disponible en: <<http://www.alvarion.com/>>.
- [XLVI] Terabeam-proxim Wireless compañía manufacturera dispositivos inalámbricos, citado en abril 2011 Disponible en: <<http://www2.proxim.com/products.html>>.
- [XLVII] Mikrotik Router and Wireless, (online), citado en abril 2011. Disponible en: <<http://www.mikrotik.com/>>.
- [XLVIII] Fabricante de Radios Wi-Fi IEEE802.11 Ubiquity Networks, (online), citado en abril 2011, Disponible en: <<http://ubnt.com/>>.
- [XLIX] CHEBROLU, Kameswari, RAMAN Bhaskaran, SEN Sayandeep. Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience. In ACMMOBICOM, 2006.
- [L] AGUAYO, Daniel, BICKET, John, BISWAS, Sanjit, JUDD, Glenn, and Robert Morris. Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network. In SIGCOMM, 2004.
- [LI] BARSOCCHI, Paolo, OLIGERI, Gabriele y POTORTI, Francesco. Frame error model in rural Wi-Fi networks. IEEE Transactions on wireless communications, 2009.
- [LII] Ixem labs, (online), citado abril 2011, Disponible en: <[http://www.ixem.polito.it/news/research/22\\_03\\_2007\\_e.htm](http://www.ixem.polito.it/news/research/22_03_2007_e.htm)>
- [LIII] Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR), (Online), citado abril 2011, Disponible en: <<http://gtr.telecom.pucp.edu.pe>>.
- [LIV] Technology and infrastructure for emerging regions (TIER) (online), citado abril 2011, Disponible en: <<http://tier.cs.berkeley.edu/wiki/Home>>.
- [LV] Systems and Networks Research group (SynerG) (online), citado abril 2011, Disponible en: <<http://www.cse.iitb.ac.in/synerg/doku.php>>.
- [LVI] Networs Research Group (WAND) (Online), citado abril 2011, Disponible en: <<http://wand.cs.waikato.ac.nz>>.