

# MODELO DE TRABAJO PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE REDES EN MALLA WIFI COMO UNA SOLUCIÓN PARA EL ACCESO A BANDA ANCHA EN ÁREAS RURALES

WORKING MODEL FOR THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF WI-FI MESH NETWORK AS A BROADBAND ACCESS SOLUTION IN RURAL AREAS AND ROUTING IN CORE NETWORKS



## AUTOR

GUEFRY LEIDER AGREDO MÉNDEZ  
Magister en Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Docente de Planta de TC  
Departamento de Telecomunicaciones  
gagredo@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

VIRGINIA SOLARTE MUÑOZ  
Especialista en Redes y Servicios  
Telemáticos  
\*Universidad del Cauca  
Docente de Planta de TC  
Departamento de Telecomunicaciones  
vsolarte@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

PEDRO SOLARTE VARNEY  
Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones  
\*Universidad del Cauca  
Investigador Asociado  
GNTT  
psolarte@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## INSTITUCIÓN

\*UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
UNICAUCA  
Universidad Pública  
Calle 5 # 4 – 70  
decafiet@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## Información del proyecto

Nombre del Proyecto: "Análisis, uso, adecuación y apropiación de servicios sobre tecnologías inalámbricas en zonas de difícil acceso de las poblaciones indígenas del Cauca andino"  
Fecha de Inicio: Noviembre de 2007  
Fecha de Finalización: Noviembre de 2009  
Institución Ejecutora: Universidad del Cauca  
Dependencia de la Institución Ejecutora: Departamento de Telecomunicaciones  
Sub-dependencia de la Institución Ejecutora: Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.  
Institución Financiador: Programa FRIDA / LACNIC, ISOC, IDRC

**Recepción:** Septiembre 16 de 2009

**Aceptación:** Diciembre 26 de 2009

**Temática:** Acceso y Conectividad inalámbrica & Sistemas inalámbricos y móviles

**Tipo de Artículo:** Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

**RESUMEN**

Actualmente los servicios banda ancha se han convertido en una excelente y además rentable oportunidad para los actuales y futuros ISP's y WISP's, los cuales buscan a través de nuevas tecnologías de gran cobertura pero además de bajo costo llegar a zonas de difícil acceso, especialmente a las zonas rurales, aunque actualmente se cuenta con tecnologías inalámbricas como WIMAX y Wi-Fi para ello aun no ha sido posible lograr este propósito con un alto grado de efectividad ya sea por los elevados costos que implica su implementación o también por las limitaciones de la misma tecnología. Debido a esto se busca atenuar el problema desplegando redes inalámbricas en malla bajo la tecnología Wi-Fi y presentarla como una alternativa tecnológica y económicamente viable, capaz de competir con otras tecnologías de acceso banda ancha disponibles en el mercado de las telecomunicaciones.

**PALABRAS CLAVES**

Redes Wi-Fi en Malla  
WNM  
VoIP  
WISP's  
Wi-Fi

**ANALYTICAL SUMMARY**

In the actuality, the broadband services have become an excellent and also profitable opportunity for the current and future ISP's and WISP's, which look for through new technologies of great covering but besides low cost to reach areas of difficult access, especially to the rural areas, although at the moment it is had wireless technologies like WIMAX and Wi-Fi for it not yet it has been possible to either achieve this purpose with a high grade of effectiveness for the high costs that it implies their implementation or also for the limitations of the same technology. Due to this it is looked for to attenuate the problem deploying wireless mesh networks under the technology Wi-Fi and to present it like a technological and economically viable alternative, able to compete with other available technologies of access broadband in the market of the telecommunications.

**KEYWORDS**

Wireless Mesh Networks  
WNM  
VoIP  
WISP's  
Wi-Fi

**1. INTRODUCCIÓN**

En Colombia la necesidad de acceso a internet banda ancha así como a los servicios que esta ofrece se han convertido en un recurso tecnológico imprescindible en

la mayor parte de la población. Sin embargo factores geográficos, económicos y demográficos no permiten que muchas poblaciones especialmente las zonas rurales no puedan acceder a tales servicios o si lo pueden hacer su costo resulta ser muy alto como ocurre con el acceso satelital contrario a lo que sucede en las zonas urbanas, tales factores hacen que la brecha tecnológica siga siendo muy marcada pese a los esfuerzos realizados por otras tecnologías de acceso inalámbrico como Wi-Fi y WIMAX principalmente.

Como respuesta a esta necesidad se plantean las redes Wi-Fi en malla como una alternativa que busca ofrecer servicios banda ancha a la población de las zonas alejadas la cual no es atendida por los ISP's o WISP's existentes. Sin embargo la novedad de esta tecnología y el poco conocimiento de la misma han obligado a generar un conjunto de criterios técnicos que faciliten en primer lugar el adecuado despliegue de la WMN (WiFi Mesh Network) y en segundo lugar que sirva de referencia a los proveedores de acceso a Internet que buscan ingresar a nuevos mercados y ampliar su capacidad de suscriptores.

En el proyecto marco [1] que auspicia la generación de este artículo se aplica el modelo de trabajo propuesto al momento de diseñar e implementar una red Wi-Fi en malla para ofrecer servicios banda ancha teniendo como base el municipio de Piendamó en el departamento del Cauca considerando que hasta el momento no se tiene conocimiento de una guía que permita el despliegue de este tipo de redes y más aun en las zonas rurales de Colombia.

**1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS WMNS**

Actualmente las redes inalámbricas de área local (WLAN) son implementadas para que los usuarios móviles accedan a la red fija, permitiendo que clientes asociados a los Access Points (APs), puedan desplazarse libremente a lo largo de una oficina o cualquier otro

sitio dentro del área de cobertura. En este tipo de redes el trayecto end to end se logra a través de un solo salto, razón por la cual los clientes asociados al AP necesitan estar dentro de su rango de cobertura para así poder tener conectividad. Sin embargo, para lograr una amplia cobertura, un gran número Access Points fijos necesitan ser desplegados y cableados al backbone lo cual hace que el despliegue de una WLAN extensa sea muy costoso y demande mucho tiempo. Es por ello que aparecen las redes en malla como una alternativa que ofrece cobertura inalámbrica en áreas grandes, sin confiar en la infraestructura de un backbone cableado o en el uso de APs dedicados. En este escenario un grupo de routers mesh ofrecen red a clientes inalámbricos y permiten que la comunicación entre el grupo de routers se lleve a cabo no por uno sino a través de múltiples saltos [2].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se describen a continuación las características más importantes de las Gireles Mesh Networks (WMNs).

- **Son redes inalámbricas Multi-Salto:** Uno de los propósitos al desplegar WMNs es extender el rango de cobertura de las redes inalámbricas actuales sin comprometer la capacidad del canal, así como también facilitar la conectividad entre usuarios que están desprovistos de enlaces con línea de vista directa. Para cumplir con estos requerimientos la red inalámbrica debe contar con múltiples saltos logrando así un alto throughput, baja interferencia entre nodos y un rechazo efectivo de frecuencias.
- **Capacidad de auto-formación, auto-diagnostico, y auto-organización:** Esta característica permite a las WMNs incrementar el desempeño, garantizar el fácil despliegue, fácil configuración, baja tolerancia ante fallas.
- **Compatibilidad con redes inalámbricas existentes:** Las WMNs basadas en tecnologías IEEE 802.11 además de ser compatibles con los estándares IEEE 802.11 también pueden hacer uso de otras redes inalámbricas como son WiMAX, Zigbee y redes celulares.
- **Robustez:** Las WMNs son más robustas que las redes de un solo salto debido a que no dependen del desempeño de un solo nodo para su operación. En las redes de un solo salto, si el único punto de acceso está fuera de servicio, también lo está la red. En la arquitectura de red mallada, si el Mesh Access Point (MAP) más cercano está fuera de servicio o existe interferencia local la red continúa operando; simplemente se dirigen los datos a través de una ruta alterna. El uso de varias rutas para entregar los datos aumenta el ancho de banda eficaz de la red.

## 1.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS WMN'S

Una red en malla está compuesta por una colección de nodos que se comunican entre sí de manera directa. Si no existe una entidad central que los controle [3] el modo de operación se conoce como distribuido pero si existe una entidad central que administre las condiciones de operación de la red se conoce como centralizado.

Un aspecto fundamental del funcionamiento de las redes en malla es que la comunicación entre un nodo y cualquier otro puede ir más allá del rango de cobertura que cualquier nodo individual. Esto se logra haciendo un enrutamiento multisalto, es decir, que si un par de nodos desean comunicarse entre sí pueden hacerlo a través de nodos intermedios presentes en la ruta. Esto es importante si se compara con las redes inalámbricas tradicionales, donde los nodos deben de estar dentro del rango de cobertura de la estación base y sólo se pueden comunicar con otros nodos mediante los AP, que a su vez necesitan de una red cableada para comunicarse entre sí. Con las redes en malla la conexión directa a la estación base no es una limitación ya que existe un nodo central con conexión a Internet llamado Gateway. En esta red mallada cada MAP no solo opera como un host, sino también como un router, retransmitiendo los paquetes en nombre de otros nodos que no se encuentren dentro del rango de cobertura de la Gateway.

## 1.3 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA LAS WMN'S FIJAS

Los protocolos de enrutamiento calculan o descubren las rutas de menor peso o costo entre el nodo origen y el nodo destino. El costo o peso está definido a través de las métricas de enrutamiento [3]-[6]. Cada ruta tiene una métrica y generalmente es la suma de todos los pesos de los enlaces presentes en la misma.

Los protocolos de enrutamiento se desempeñan muy bien en las redes MANET (*Mobile Ad Hoc Network*), es decir, cuando sus nodos son estaciones móviles y la topología de la red cambia constantemente, y por lo tanto tienen funcionalidades de enrutamiento a nivel 3. Sin embargo, para el caso de las WMNs fijas (las cuales no tiene movilidad y sus rutas varían con menor frecuencia) este tipo de protocolos no son los más adecuados ya que estas redes están compuestas por MAPs y STAs (Stations), los cuales son dispositivos de nivel 2, incapaces de decodificar el paquete IP.

- **Protocolo Híbrido de Malla Inalámbrica (Hybrid Wireless Mesh Protocol, Hwmp)**

*HWMP*, es un protocolo de enrutamiento híbrido. Es decir, contiene componentes de enrutamiento reactivo como también componentes de enrutamiento proactivo.

La base de HWMP es una adaptación del protocolo OADV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) llamado *Radio-Metric AODV* (RM-AODV). Mientras que AODV trabaja en el nivel 3 con direcciones IP y utilizando *hop count* como métrica de enrutamiento, RM-AODV trabaja en el nivel 2 con direcciones MAC y usando la métrica de enrutamiento *Radio-Aware* para la selección de rutas [7].

HWMP usa números de secuencia destino de manera ordenada con el fin de detectar datos anteriores o pérdida de información de enrutamiento. Si la información de enrutamiento actual tiene un número de secuencia menor que el número de secuencia de la información almacenada por el *mesh point* se descartara por considerarse obsoleta. Esto evita la formación de ciclos de enrutamiento y problemas conocidos para los protocolos vector distancia como son los conteos infinitos.

En HWMP las entradas a las tablas de enrutamiento, por ejemplo rutas, tienen tiempos de vida asociados a ellas, esto significa que cuando el tiempo de vida haya terminado las rutas no usadas automáticamente serán borradas. Cada vez que las tramas de datos son transmitidas a través de las rutas o mediante mensajes de control de enrutamiento el tiempo de vida asociado es reseteado.

- Protocolo de Enrutamiento a Nivel Mac "Inteligente" para Redes Inalámbricas en Malla

Cada nodo posee una tabla de enrutamiento la cual contiene la información de cada uno de los vecinos a un solo salto a través del cual es posible alcanzar el nodo destino junto con el peso de la ruta. Periódicamente los nodos difunden la información de sus tablas de enrutamiento a través mensajes *HELLO*. Usando esos mensajes de refresco, cada nodo actualiza su tabla usando un protocolo de enrutamiento basado en el estado del enlace que mantiene las direcciones de los próximos saltos para alcanzar un destino. Cada nodo memoriza el número de identificación del paquete antes de reenviarlo con el fin de evitar el problema del conteo infinito.

Cuando un AP envía un paquete a un AP destino "D", este busca la entrada d en la tabla de enrutamiento y elige el próximo salto asociado a la ruta de menor peso para alcanzar "D". En caso de que la ruta hacia el próximo salto este ocupada el AP seleccionara una ruta alterna para alcanzarlo [8]

Protocolo de Expansión de Árbol (Spanning Tree Protocol, STP)

Este protocolo de nivel 2 construye un árbol de la topología de la red a partir de cualquier dispositivo STP (*router, switch* u otros), el cual al momento de encenderse tratara de convertirse en nodo raíz del árbol STP mediante el envío de paquetes de datos denominados BPDU (*Bridge Protocol Data Unit*) a través de todos sus puertos. La dirección del receptor del paquete BPDU es una dirección de un grupo *multicast*, esto permite al paquete BPDU atravesar dispositivos no inteligentes como *hubs* y *switches* no STP [9].

## 2. METODOLOGÍA

Dentro de la planeación, diseño e implementación de redes Wi-Fi en malla se debe tener en cuenta el diagrama de bloques propuesto en la Figura 1 [10], en este modelo cada etapa posee una o más fases y cada fase a su vez está acompañada por un conjunto de actividades relacionadas, es decir, los criterios técnicos que se describen a continuación. Teniendo en cuenta que no se encuentra una guía general para el desarrollo del modelo, se hace esta propuesta de un modelo de trabajo para el diseño e implementación de redes wi-fi en malla como solución de acceso banda ancha en zonas rurales, que se organiza en fases donde el aporte de los autores se obtiene de su experiencia en la realización de diseños, estudios e instalaciones de redes inalámbricas para la prestación de servicios banda ancha en las zonas de difícil acceso del Cauca Andino para atender población indígena [1], y en diferentes lugares de Colombia y para diferentes empresas del sector.

Fase 1: Definición del Entorno De Implementación del Sistema.

1. Caracterización del Área de Cobertura: Conocer el área de cobertura dentro de la cual se desplegara la red en malla, constituye una actividad importante dentro de la etapa de la misma dado que permite estimar la cobertura total que tendrá el sistema. Las zonas rurales en general hacen referencia a pequeños grupos poblacionales alejados de las cabeceras municipales. En Colombia aun existen muchas poblaciones de este estilo que ameritan el acceso a internet bajo la tecnología propuesta y aunque hay otras como son la satelital, Wimax y celular para llegar a estas zonas, los operadores existentes las han descartado debido a la baja densidad de población, las ubicaciones remotas y los altos costos de implementación.

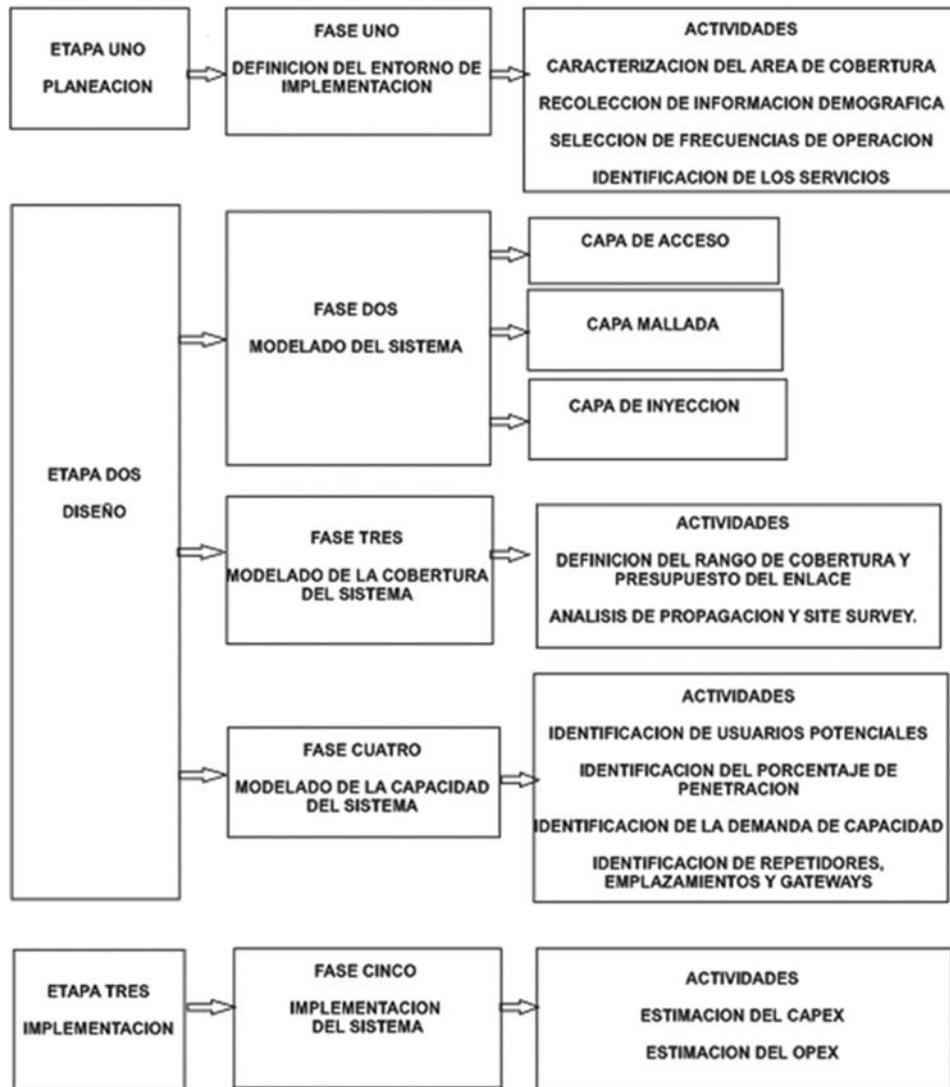


FIGURA 1. Diagrama de bloques del Modelo de Trabajo propuesto.

2. Recopilación de la información Demográfica: El estudio demográfico permite identificar las zonas con mayor densidad de población y su distribución, también caracterizar a la población de acuerdo al número de hogares, nivel educativo y el grado de desarrollo económico e industrial de la zona. Esta información es importante ya que permite proyectar el impacto y la demanda de servicios por parte de los habitantes de la zona para así poder determinar que tan viable resulta desplegar la red bajo estas condiciones. Conocer la distribución de la población en la zona de cobertura de la red Wi-Fi en malla permitirá determinar la capacidad del sistema debido ya que su cálculo depende del número de usuarios.

3. Selección de las frecuencias de operación: Teniendo en cuenta las características de las redes Wi-Fi en malla y las características de las zonas rurales dentro de las cuales se implementara la red es recomendable hacer uso de las bandas no licenciadas, en primer lugar por tratarse de un recurso gratuito y en segundo lugar por tratarse de una zona con baja interferencia debido a la ausencia de operadores inalámbricos. Sin embargo, como se trata de un recurso compartido, es necesario considerar aspectos como la elección de las bandas de frecuencias de operación, técnicas de asignación de canales, técnicas de modulación y control de potencia, además de ello se deberá tener en cuenta las restricciones en cuanto a los niveles de potencia permitidos.

4. Servicios: Después de obtener la información demográfica, elegida la banda de frecuencias y definidas las zonas con mayor demanda de servicios banda ancha se hace necesario realizar un análisis de los diferentes servicios que en algún momento pueden requerir los habitantes de una zona rural.

El principal servicio a ofrecer es el de acceso a internet banda ancha, ya que es el servicio que menos complejidad presenta al momento de su instalación dado que requiere de un punto de acceso a internet, Gateway(s), torres, MAPs repetidores y CPEs cliente para recibir la señal.

Otro de los servicios bandera que un WISP puede ofrecer es el de VoIP (Voice Over Internet Protocol), empaquetando la voz en datos IP, como alternativa a las comunicaciones tradicionales de voz, ofreciendo

grandes beneficios a las zonas rurales tales como la reducción de costos y servicios adicionales como PBX virtual y todas las funcionalidades de una central telefónica convencional sin hacer uso de la RTPC, convirtiéndose por todos sus beneficios en el servicio preferido por los proveedores.

Fase 2: Modelado del Sistema.

1. Capa de Acceso: La capa de acceso Wi-Fi tiene en cuenta un conjunto de factores que influyen en el diseño de las WMNs. Cobertura, propagación de RF y problemas de interferencia hacen necesaria una descripción detallada del sitio que permita la mejor ubicación de los MAPs, ubicación y selección de antenas además de elegir el mejor esquema para el re-uso de frecuencia. Figura 2.

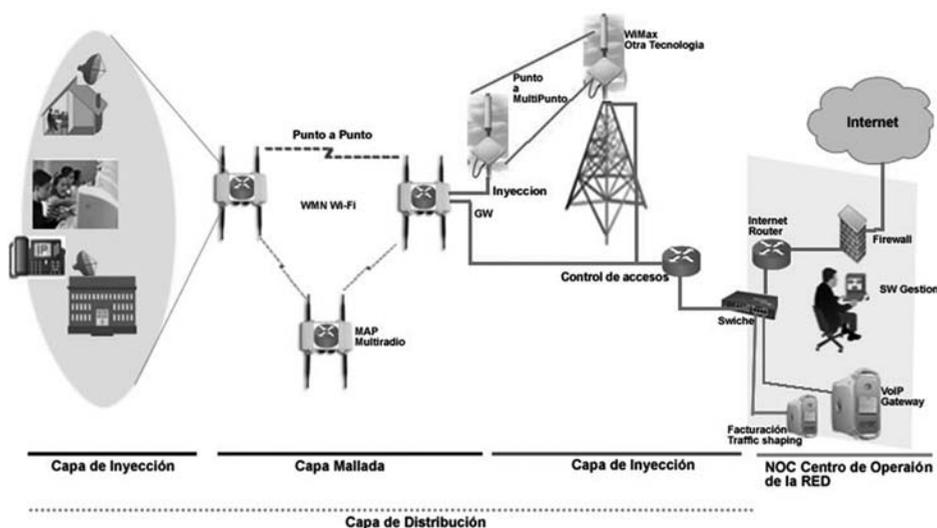


FIGURA 2. Arquitectura de Red Multi-Capa

La adecuada disposición de los MAPs asegura el escalamiento además las funcionalidades de los MAP tales como la autenticación, encriptación, compatibilidad con los estándares 802.11 b/g y la asignación dinámica de direcciones IP hacen que se logre interoperabilidad con la mayoría de dispositivos cliente 802.11, por lo tanto los equipos 802.11 b/g son la elección más acertada para los usuarios en la capa de acceso.

2. Capa Mallada: Idealmente una WMN multiradio en la capa mallada se comporta como una red de swiches puesto que cada interfase se comunica directamente con otro radio de un MAP dedicado, permitiendo transmitir y recibir simultáneamente por diferentes canales sin

encontrar disputas por acceder al medio, provocando redundancia de caminos para llegar a su destino; esta característica multiradio nos permiten asumir para efectos de diseño que son comunicaciones *full-duplex*, para este caso cada MAP con tres interfaces tendrán un *throughput* equivalente a tres interfaces multiplicado por el *throughput* de cada enlace. Figura 2.

En muchos casos la capacidad de la capa mallada se limita a la capacidad de la Gateway. Para efectos de diseño las WMN multiradio en la capa mallada deben contar con requerimientos específicos como lo son, el *throughput* de cada enlace punto a punto, mantener un SOM a un valor promedio de 10 dBm, adicionalmente

para un óptimo desempeño en largas distancias se hace necesario tener en cuenta modificaciones específicas en el nivel MAC como son la concatenación y el *ACKTimeout*.

3. Capa de Inyección: El propósito de la capa de inyección es el de extender el *backhaul* para alcanzar los MAPs hasta un punto de inyección cableado. El uso de una capa de inyección cableada o inalámbrica trae como consecuencia un aumento en el tráfico de datos, esto significa que cada punto de inyección se convierte en un posible un cuello de botella para las WMNs. De ahí que un aspecto clave en el diseño de la capa de inyección sea la confiabilidad y *throughput* disponible en cada uno de sus enlaces cableados o inalámbricos. Como resultado de esto los enlaces de inyección pueden requerir torres dedicadas adicionales, antenas de alta ganancia y demandar mucho trabajo en la ubicación de la antena y el avistamiento para lograr la confiabilidad del sistema. Figura 2.

Fase 3: Modelado de la Cobertura del Sistema.

1. Definición del Rango de Cobertura y Presupuesto del Enlace: Hace referencia a la tabulación de todas las ganancias y pérdidas experimentadas por la señal de radio entre el transmisor y el receptor. Para ello ya se deben tener certeza de los equipos a utilizar debido a que se necesitan los datos exactos de la potencia de salida del transmisor (Ptx), pérdidas de la línea de transmisión (Ltx), la ganancia de la antena (G) y la sensibilidad del receptor de acuerdo a la modulación (S), para calcular el presupuesto del enlace, estos datos son proporcionados por cada fabricante mediante las hojas de datos (*datasheets*) que acompañan a cada dispositivo. Lo que se busca con este paso es determinar las máximas pérdidas permitidas en el enlace (L) basado en las características de los equipos a utilizar, para posteriormente utilizar este dato como uno de los parámetros de entrada en el modelo de propagación para calcular el radio de la celda.

2. Análisis de Propagación y Site Survey: La utilización de modelos de propagación es un paso obligado si se quiere realizar un diseño lo más aproximado posible a la realidad, y en especial en grandes áreas donde es necesario determinar con la mejor exactitud el número de Gateways y MAPs necesaria para brindar total cobertura.

Un Site Survey es un proceso que se realiza de manera gradual mediante el cual las personas encargadas de realizar el diseño de la red descubren y registran el comportamiento de las ondas de radiofrecuencia en la zona donde se pretende dar cobertura. Su objetivo principal es asegurar una cobertura uniforme que

brinde un servicio de calidad a los usuarios de la red. La realización de un Site Survey proporciona una visión realista de cómo se comportaría la propagación de las ondas en las instalaciones donde se piensa realizar el despliegue de la red.

Fase 4: Modelado de la Cobertura del Sistema.

1. Identificación de la cantidad de usuarios potenciales: Este ítem se resuelve con la información demográfica recolectada en la primera fase, básicamente hace referencia al número de hogares dentro del área de cobertura que podrían convertirse en usuarios potenciales del servicio. Es claro que no todas las personas dentro del área de cobertura de la red serán usuarios del sistema, por esto es necesario delimitar este dato a una cifra realista ya que de este saldrán los cálculos de capacidad del sistema.

2. Identificación del porcentaje de penetración: Este es un dato que puede extraerse de la información demográfica recolectada, es de destacar que el nivel económico en determinadas regiones puede variar de acuerdo al estrato social, al nivel educativo de la población, entre otros, de tal forma que pueda estimarse la cantidad de personas interesadas en adquirir alguno de los servicios. Esto se convierte en un factor favorable puesto que el emplear encuestas en una zona rural demandaría tiempo y dinero.

3. Estimación de la Capacidad: El propósito de este ítem es estimar la cantidad de usuarios potenciales que puede soportar la red en malla, cada celda que la conforma y la cantidad de ancho de banda necesario en los puntos de inyección o Gateways.

Para el cálculo de la capacidad de usuarios en una red Wi-Fi en malla debe tenerse en cuenta el ancho de banda soportado por cada enlace punto a punto entre dos MAPs, generalmente la velocidad máxima varía entre 19 Mbps, 22 Mbps y 35 Mbps en equipos propietarios. Las WMN's basadas en múltiples radios con soporte de concatenación y QoS pueden soportar conexiones full duplex dividiendo cada radio de backhaul en dos o más radios, uno en cada dirección. Esto habilita las conexiones simultáneas (full-duplex) desde y hasta el transmisor.

Adicionalmente el ancho de banda de la malla en el backhaul se duplica y la latencia por salto se mantiene predecible (debido a la reducción de contención en cada enlace) así como múltiples caminos para llevar la información hasta la Gateway teniendo en cuenta que el ancho de banda máximo no debe sobrepasar el ancho de banda de la Gateway evitando así los cuellos de botella.

4. Tipos de Servicio: En este ítem se deben definir los tipos de servicios que prestara la red Wi-Fi en malla. Dentro de los servicios ofrecidos por la red de un proveedor de acceso se deben tener en cuenta los servicios soportados y los diferentes niveles de calidad (QoS) así como también generar diferentes Acuerdos de Nivel de Servicio (SLAs.).

5. Factor de Sobre suscripción (OSR, Over Subscription Rate): El factor de sobre suscripción se basa en el principio que los usuarios no transmiten información a la máxima velocidad todo el tiempo y de manera simultánea. De esta manera se puede usar la multiplexación estadística para ahorrar recursos. El OSR permite maximizar el número de usuarios por Gateway en el dominio de colisiones, dando satisfacción a los usuarios del servicio. La escogencia del OSR efectivo para cada servicio permite optimizar el rendimiento de la totalidad de la WMN.

Por lo anterior el OSR depende del servicio proporcionado y varía generalmente de 4:1 a 20:1. Algunos porcentajes de sobre suscripción pueden ser, preferenciales (5% a 10%), básicos (10% a 15%) y VoIP (1 %) si se pretende dar servicio de telefonía a la totalidad de los usuarios potenciales.

6. Throughput Promedio por Usuario: Es importante determinar la demanda promedio requerida por usuario de acuerdo con los tipos de servicio que se ofrecerán (CBR, VBR, BE) así como el porcentaje de usuarios asociados a cada uno de estos. En términos de capacidad TDD (Time Division Duplex) en la red de acceso hace uso del throughput agregado que consiste en la suma de los dos flujos, puesto que se comparte un mismo canal.

7. Throughput total de la WMN: El objetivo de este punto es el de estimar la demanda de capacidad exigida a la malla de acuerdo a los servicios que soporta. El cálculo del throughput total de la malla lo determinan el número total de suscriptores y el throughput promedio por usuario (1)

$$Throughput_{Total} = NumeroSuscriptores_{Total} \times Throughputpromedio_{Usuario} \quad (1)$$

8. Capacidad de Usuarios por Celda: Es necesario determinar la capacidad de usuarios por celda puesto que el medio de acceso en 802.11 es compartido y se debe distribuir equitativamente entre los usuarios de la celda.

$$NumerodeSuscriptores_{celda} = \frac{Throughput_{acceso}}{Throughput_{usuario}} \quad (2)$$

El número de suscriptores como lo muestra (2) está asociado al ancho de banda, este depende de varios factores como son la distancia, la modulación y el throughput, teniendo en cuenta que a mayor throughput hay mayor probabilidad de errores.

9. Gateways: Ofrecen soporte a las comunicaciones de la malla, estos puntos pueden ser inalámbricos o cableados dependiendo de las necesidades de acceso. ADSL ofrece anchos de banda aproximados de 1.5 Mbps a diferencia de la fibra óptica que permite tener conexiones DS-3 ideales para estos entornos.

Conociendo el ancho de banda total esperado para la malla ya se puede calcular el número de Gateways necesarias para dar soporte a la capacidad estimada. Para ello se debe dividir el Troughput total de la WMN por el ancho de banda obtenido en las Gateways tal como lo muestra (3).

$$Numero\_Gateways_{WMN} = \frac{Throughput_{Total}}{BW\_Gateway} \quad (3)$$

10. Ancho de banda promedio de los Enlaces: Es importante determinar el ancho de banda promedio de los enlaces puesto que nos va a dar un estimativo del throughput soportado por la WMN, este ítem es dependiente del número de interfaces de la WMN que equivale al número de caminos posibles. Debido a muchos factores que se presentan en los enlaces punto a punto de la WMN el throughput del enlace es mucho menor al de la tecnología para 802.11a, el mejor throughput posible varía entre 18 Mbps y 20 Mbps, al hacer uso de la concatenación y soporte de QoS en los enlaces este valor puede mejorar a 35 Mbps. (4)

$$Throughput_{MAP} = Interfases_{MAP} \times Anchodebanda_{promedioenlaces} \quad (4)$$

11. Número de suscriptores por Gateway: Este ítem tiene como objetivo determinar la capacidad de usuarios por Gateway o dominio de colisiones; para este fin es necesario usar los datos de capacidad del canal en la Gateway y throughput promedio por usuario derivando así todo el dominio de colisiones a los canales soportados en cada Gateway. La expresión (5) permite calcular el número de suscriptores por Gateway.



La selección de los equipos tal como lo indica la Tabla 1 se hizo de acuerdo a las frecuencias de operación seleccionadas las cuales fueron 2.4 GHz y 5.8 GHz, respectivamente.

Con respecto a la capa de acceso los usuarios del Municipio de Piendamó debido al tipo de acceso deben compartir el ancho de banda mutuamente, además el uso de la modulación adaptativa la cual varía de con la longitud y las condiciones del terreno hacen que el área de cobertura de un MAP en acceso tenga varios niveles de modulación y throughput, recordando que un cliente que se conecte a la menor velocidad posible 2 Mbps, reduce el ancho de banda total de la red de acceso. La manera más fácil de evitar esto es la modificación del ACKtimeout, permitiendo tener más usuarios en distancias más largas sin la disminución apreciable del ancho de banda, por lo tanto es necesario determinar o estimar la cantidad de usuarios en el área de cobertura.

Con respecto a la capa de inyección para el municipio de Piendamó se asume conexión por fibra óptica la cual es suministrada por alguno de los operadores presentes en la zona

Con respecto al porcentaje de penetración se asume un 20% así mismo la sensibilidad de los equipos es obtenida de los valores por defecto de acuerdo a la modulación. La tabla 2 muestra el mínimo nivel de señal en recepción RSSmin para la modulación y codificación del estándar IEEE 802.11 a/g.

**TABLA 1.** Características de los equipos recomendados

<b>Dispositivos del sistema</b>	
<b>Parámetros</b>	
Estándar	802.11 A o G
Duplexación	TDD
Frecuencias	5800 GHz y 2400 GHz
<b>Capa Mallada 5.8 GHz [meshDynamics]</b>	
Potencia de Transmisión (dBm)	26
Ganancia de la Antena de Transmisión y Recepción en (dBi)	23
Perdidas de conectores	2
Perdidas del cable de transmisión (dB/m)	0.2

Altura de la estación repetidora (m)	26
EIRP (dBm)	46.8
SOM (dB)	10

#### **Capa de Acceso 2.4 GHz [Meshdynamics]**

Potencia de Transmisión (dBm)	20
Ganancia de la antena de transmisión (dBi)	15
Perdidas de conectores	1
Perdidas del cable de transmisión (dB/m)	0.2
Altura de la estación repetidora (m)	26
EIRP	34

#### **Equipo Cliente CPE outdoor CPE/AP/Bridge/Router integrado en antena.**

Potencia de Transmisión (dBm)	17
Ganancia de la antena de transmisión (dBi)	10
Perdidas de conectores	1
Perdidas del cable de transmisión (dB/m)	0.2
Altura de la estación recepeora (m)	7
EIRP (dBm)	26
Rango de Frecuencias (MHz)	2400 - 2500

**TABLA 2.** Requerimientos de la capa física (802.11 A/G) Wi-Fi

<b>Esquemas de Modulación y Codificación</b>	<b>Tasa de la capa Física</b>	<b>Nivel mínimo de RSSmin. en (dBm) para el estándar 802.11</b>	<b>Throughput Aproximado del enlace</b>
BPSK ½	6 Mbps	-82 dBm	2 Mbps
BPSK ¾	9 Mbps	-81 dBm	4 Mbps
QPSK 1/2	12 Mbps	-79 dBm	6 Mbps
QPSK 3/4	18 Mbps	-77dBm	9 Mbps
16-QAM 1/2	24 Mbps	-74 dBm	12 Mbps

16- QAM ¾	36 Mbps	-70 dBm	18 Mbps
64-QAM 2/3	48 Mbps	-66 dBm	20 Mbps
64- QAM ¾	54 Mbps	-65 dBm	23 Mbps

Para realizar los cálculos de capacidad de la red Wi-Fi en malla se deben tener en cuenta el número de interfaces y el throughput en cada una de ellas, de esta manera se asume que el throughput con tres radios mallados dedicados es igual a 54 Mbps (3 radios \* 18 Mbps = 54 Mbps). Es necesario además conocer la distancia entre MAPs recomendando para efectos de diseño saltos de 4 Km y un radio de celda de 2 Km en promedio.

Para los cálculos de cobertura y mejor ubicación de los MAP's se empleó la herramienta Radiomobile teniendo en cuenta una línea de vista directa entre las estaciones comunicantes y la modulación asociada al nivel mínimo en recepción para cada una de ellas.

Con respecto al diseño de la malla se deben tener en cuenta las exigencias de los usuarios del sistema, en este sentido es necesario definir el porcentaje de usuarios que espera soportar la WMN, estos porcentajes varían de acuerdo a las necesidades de los clientes, por ejemplo al escoger que 100 % de los usuarios trabajen con la máxima capacidad el canal con su correspondiente modulación hace necesario derivar esa capacidad a la Gateway, teniendo en cuenta el número de radios y el throughput asociado a estas y así evitar los indeseables cuellos de botella.

Primero se deben determinar los parámetros de los niveles de servicio que se ofrecerán a los usuarios:

- Usuarios corporativos: VBR, 1 Mbps CIR (OSR 10), 2 Mbps MST (OSR 15) correspondientes al 8.3 % de la totalidad de la población.
- Usuarios Residenciales plus: VBR, 512 CIR (OSR 10), 762 Kbps MST (OSR 20), correspondientes al 16 % de la totalidad de la población.
- Usuarios residenciales: VBR 500 Kbps, MST (OSR 30) correspondientes al 75.70 % de la población. Dado el caso de la cantidad e suscriptores básicos tan elevados se puede asumir un nivel de OSR más alto.
- Usuarios con VoIP: CBR, tráfico de 500 mErlan/línea, 1% GoS, correspondiente al 60% del total de la población y se hace uso del códec G.729.

Con los parámetros de servicio definidos se calcula la velocidad promedio por usuario que la WMN multiradio debe soportar, este dato debe tener en cuenta las velocidades de cada nivel de servicio así como el factor de sobre suscripción OSR de cada servicio y el porcentaje de usuarios de cada uno.

$$BW_{Promedio} = 8.3\% \left[ \frac{1000}{10} + \frac{(2000 - 1000)}{15} \right] + 16\% \left[ \frac{512}{10} + \frac{(762 - 512)}{20} \right] + 75.70\% \left[ \frac{500}{30} \right]$$

$$BW_{Promedio} = 37Kbps$$

De esta manera en la gateway se debe asegurar un tráfico Full dúplex de al menos 50 Kbps por usuario. Con estos cálculos y las expresiones matemáticas mencionadas anteriormente se elabora la Tabla 3 la cual contiene los resultados para el diseño de la red Wi-Fi en malla para el municipio de Piendamó.

**TABLA 3.** Resultados en la planeación de la totalidad de la red Wi-Fi en malla para 1200 usuarios.

Requerimientos del sistema	Resultados
Cantidad de Hogares en el área.	6.000
Área total de cobertura.	66.5 Km <sup>2</sup>
Área estimada por celda.	2 Km <sup>2</sup>
% de penetración del servicio.	20 %
Cientes totales.	1.200
Usuarios promedio por celda.	85
Numero de Gateways.	3
Celdas necesarias.	14
Throughput promedio usuario bidireccional en gateway.	37 kbps
Throughput total soportado en la Totalidad de las gateways.	43.970 Kbps
Throughput total soportado en cada una de las gateways.	15.000 Kbps
Capacidad de la WMN multi-radio (3 Radios).	54 Mbps
Throughput punto a punto en la malla sin saturación.	18 Mbps
Usuarios por Gateway	409
Modelo de propagación.	ITRM Radio Mobile

Para satisfacer las necesidades de tráfico de Internet en el municipio de Piendamó y la población estimada son necesarias tres *Gateways* y un total de 12 MAP de tal manera que se tiene un *cluster* de 14 celdas. De acuerdo al modelo de propagación y los resultados obtenidos con los datos de clientes y MAPs, cada celda y repetidor son suficientes teniendo en cuenta cobertura y capacidad. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta un radio de celda que no superara los 3 kilómetros, el cual es el recomendado para mantener comunicaciones eficientes, también se tiene en cuenta la máxima capacidad de *throughput* (22 Mbps y 18 Mbps) en los niveles de acceso y malla respectivamente.

La Figura 4 muestra el diseño final de la red Wi-Fi en malla para el Municipio de Piendamó según los criterios expuestos.

En el contexto de la VoIP interesa determinar la cantidad de ancho de banda dedicado que debe reservarse para soportar un número de conversaciones VoIP simultáneas. En este punto se analiza el modelo de diseño para el soporte de la VoIP. Este tiene que ver con el *throughput* total de la red y el ancho de banda disponible en la *Gateway*, adicionalmente se debe tener en cuenta el *throughput* agregado por cada una de las celdas de acuerdo a su capacidad.

Por lo anteriormente expresado se asume que el 60 % de los clientes del WISP WMN tendrán el servicio de VoIP, cada uno de estos usuarios durante la hora pico ocupara 30 minutos correspondiente a un tráfico de 0.5 Erlang (500 mE) por suscriptor, asumiendo un porcentaje de bloqueo de 1 % que equivale al grado de servicio GoS (Grade of Service) y el uso del codec G.729.

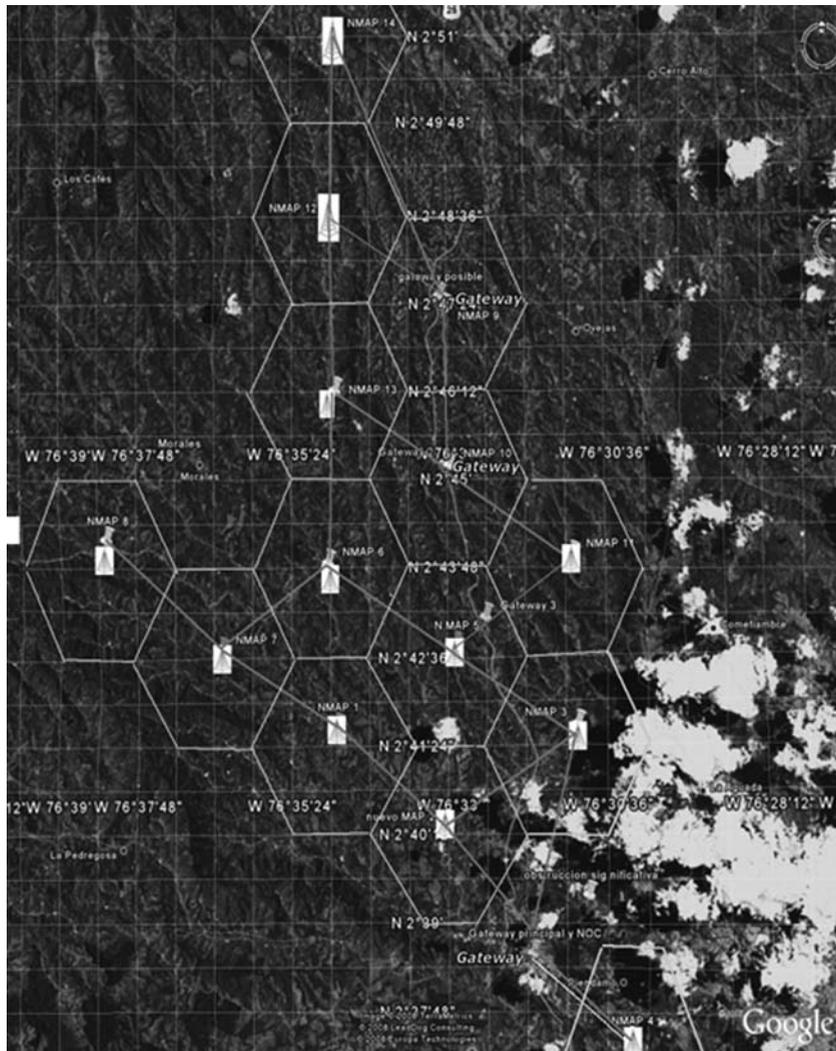


FIGURA 4. Trazado final de la red Wi-Fi en malla para el Municipio de Piendamó.

Para determinar el ancho de banda reservado desde la Gateway y soportar la cantidad de llamadas simultáneas se debe saber el número de clientes o líneas que se usaran simultáneamente en este caso son 720 líneas. Para esto debemos encontrar el tráfico generado por estas 720 llamadas o si se desea para efectos de adaptación para cada Gateway se puede dividir el tráfico en las 3 Gateways, de tal manera cada una tendrá que soportar 240 líneas.

$$T = 240 \times 500mE / \text{Línea} = 120\text{Erlang}$$

Teniendo el tráfico por gateway en Erlangs nos dirigimos a la tabla de ErlangB y asumiendo un valor para GoS de 1 % podemos determinar el número de llamadas simultáneas por Gateway. A partir de esto se determina que el número de llamadas VoIP simultáneas soportadas es de 139 en cada gateway, teniendo estos datos y el codec G.729(A) podemos observar que el ancho de banda para soportar tráfico de VoIP en la Gateway es de:

$$BW_{VoIP} = 120 \times 24\text{Kbps} = 2.448 \text{ Kbps}$$

Para el total de la malla deben reservarse 7.344 Kbps para el tráfico de VoIP y 2.448 kbps en cada Gateway, ahora al ancho de banda total por suscriptor debe restarse el tráfico de VoIP con el fin de determinar el número de usuarios de datos y VoIP que pueden soportar las Gateways. La Tabla 4 muestra los resultados finales.

$$N_{usuarios} \text{ Gateway} = \frac{15.000 - 2.448}{37} = 339$$

**TABLA 4.** Resultados para la Capacidad de la red Wi-Fi en malla

Requerimientos del sistema	Resultados
Cantidad de Hogares en el área	6.000
Área total de cobertura	66.5 Km <sup>2</sup>
Área estimada por celda	2 Km <sup>2</sup>
% de penetración del servicio clientes de datos	20 %
Clientes totales Datos	1.200
% de penetración del servicio clientes de VoIP	60 %
Clientes totales VoIP de la WMN	720
Usuarios promedio por celda	85
Numero de Gateways	3

Celdas necesarias	14
Throughput promedio usuario bidireccional en gateway	37 kbps
Throughput requerido por usuario VoIP	24 Kbps
Throughput total Requerido en las gateways	45.000 Kbps
Throughput total Requerido en las gateways para VoIP	7.344 Kbps
Capacidad de la WMN multi-radio (3 Radios)	54 Mbps
Throughput punto a punto en la malla sin saturación	18 Mbps
Modelo de propagación	ITRM Radio Mobile

Finalmente se realiza el procedimiento para dimensionar el sistema de suministro de potencia basado en energía solar para la red Wi-Fi en malla.

Como requisito de entrada es necesario contar con una cantidad de energía promedio por día para una zona geográfica dada. Además se debe asegurar que el suministro de energía será confiable aun en días nublados o con bajos niveles de radiación solar.

La energía requerida dependerá de la potencia consumida por los MAP y el tiempo de operación promedio por día. Para el caso del municipio de Piendamó, es necesario tener en funcionamiento 14 MAP los cuales consumen 16W teniendo en cuenta el número de radios y operando durante las 24 horas del día, por lo tanto la energía requerida por cada MAP será de  $1 \times 16 \times 24 = 384$  W/hora en promedio cada día. En este ejemplo simple, los MAP demandaran aproximadamente 670 mA a 24V cada uno.

Es conveniente que la energía generada por el arreglo fotovoltaico en el mes con mínima radiación promedio, al menos sea igual a la energía demandada (incluyendo las pérdidas). Con esto se asegura que en los días con mayor radiación promedio no habrá deficiencia de energía, de ahí que la orientación de los módulos sea otro factor a tener en cuenta. La inclinación de los módulos más adecuada, es igual a la latitud del lugar más 15°. Para el caso del municipio de Piendamó, la orientación más adecuada para los módulos será de 17° grados respecto de la horizontal viendo hacia el norte.

Debido a que no se cuenta con un mapa detallado para determinar la radiación promedio sobre el plano horizontal para el municipio de Piendamó, se estima que la radiación promedio incidente sobre los módulos orientados a 2° respecto a la horizontal es de 6 horas-pico.

Al tomar un factor de 20% para compensar las pérdidas de energía, (en las conexiones, en el regulador y en las baterías), la energía demandada será de aproximadamente 461 Watts-hora. Por lo tanto la potencia pico de los módulos requeridos deberá ser de 461 W-h/6 horas pico=77 W pico. O sea, que para el presente ejemplo, requerimos de un solo modulo de 77 W a 80 W pico, el cual puede encontrarse comercialmente.

Teniendo en cuenta las características técnicas del MAP se observa que se necesita corriente directa pero en caso de necesitar de corriente alterna se debe usar un inversor. En tal caso, habrá que considerar las pérdidas de energía en la conversión CD a AC. Por ejemplo, si se tuviera un inversor que en operación tuviera una eficiencia de 90% significaría que tendríamos que agregar un 10% a las capacidades que hemos calculado previamente.

Dados los parámetros de los módulos, podemos ver que la corriente máxima generada por el modulo a 24 voltios es del orden de 3,3 amperios, por lo que bastara con un controlador que a la entrada pueda soportar 5 amperios. Si además se tiene un controlador que proteja la descarga de las baterías, podemos ver que a su salida manejará una corriente máxima aproximada de 16 Watts/24 voltios= 667 mA. Es decir, seleccionaremos un controlador que permita manejar corrientes de 1A a 3A de descarga.

## CONCLUSIONES

El modelo de trabajo y los criterios técnicos generados constituyen un aporte valioso ya que brindan una clara orientación hacia la implementación de redes Wi-Fi en malla como una solución que busca ofrecer acceso banda ancha a las zonas rurales a un bajo costo debido a características tales como la robustez, escalabilidad, flexibilidad, auto configuración y auto regeneración.

La disponibilidad de equipos comerciales asequibles crea un excelente escenario para la evolución de las redes en malla. El grupo de estándares de la IEEE 802.11 ingresan a una nueva era de acceso inalámbrico banda ancha y sus aplicaciones logrando que el extenso mercado de las WLAN ayude a disminuir aun más los costos de los dispositivos permitiendo alcanzar mejoras continuas en ancho de banda, consumo de energía, seguridad y calidad de servicio.

Este trabajo demostró que la red Wi-Fi en malla puede ser desplegada en zonas que carecen de suministro eléctrico gracias a que los dispositivos inalámbricos (MAP's) pueden ser adaptados a otras fuentes de energía alternativa como la energía solar.

Para cada uno de estos escenarios se tuvieron en cuenta las características técnicas de los MAP's ,CPE's, el número de caminos, distancias, retardos, capacidad de las Gateways, así como también la capacidad de cada enlace con las mejoras específicas a la tecnología como son la concatenación y el *ACKTimeout* [12], derivando así el dominio de colisiones a las gateways de acuerdo al throughput y a la cantidad de usuarios asociados a la red en malla.

Las distancias de los enlaces fueron seleccionadas tal manera que conservaran una relación entre cobertura y capacidad, además debido al terreno ondulado de esta zona no permitía tener celdas de mayor tamaño puesto que se encuentran gran cantidad de depresiones y pequeñas montañas a lo largo de los trayectos.

## REFERENCIAS

- [1] AGREDO, Guefry. Análisis, Uso, Adecuación y Apropiación de Servicios sobre Tecnologías Inalámbricas en Zonas de Dificil Acceso de las Poblaciones Indígenas del Cauca Andino" En 1er Encuentro FRIDA: "Investigaciones en Tecnologías de la Información y Comunicación y políticas públicas en América Latina y el Caribe" 2009. Montevideo (Uruguay). Disponible en: [http://www.programafrida.net/docs/frida2009/presentaciones/Guefry\\_Leider\\_Agredo\\_Mendez.pdf](http://www.programafrida.net/docs/frida2009/presentaciones/Guefry_Leider_Agredo_Mendez.pdf)
- [2] ZHANG. Y, LUO. J, y HU. H. Wireless Mesh Networking. Ed: Auerbach Publications, Taylor & Francis Group. New York, 2007, pp.550
- [3] DRAVES, Richard, PADHYE, Jitendra y ZILL, Brian. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks. Disponible en: <http://research.microsoft.com/mesh/papers/multiradio.pdf>
- [4] ADYA, A., BAHL, P., PADHYE, J., WOLMAN, A., y ZHOU, L.. A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks. Tech. Rep. MSR-TR-2003-44, Microsoft Research, July 2003. Disponible en: <http://research.microsoft.com/~adya/pubs/broadnets-2004.pdf>
- [5] De COUTO, D., AGUAYO, D., BICKET, J. C., y Morris, R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. in Proc. of ACM MobiCom, 2003. Disponible en: <http://pdos.csail.mit.edu/papers/grid:mobicom03/paper.pdf>

- [6] ROY, Sabyasachi, KOUTSONIKOLAS, Dimitrios, DAS, Saumitra, y HU, Charlie. HighThroughput Multicast Routing Metrics in Wireless Mesh Networks. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907. Disponible en: <http://web.ics.purdue.edu/~smdas/ICDCS06-SPP.pdf>
- [7] BARHR, Michael. Proposed Routing for IEEE 802.11s WLAN Mesh Networks. Siemens Corporate Technology, Information & Communications. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1071646>
- [8] MANIEZZO, D., VILLA, G., GERLA, M. A 'Smart' MAC-Routing Protocol for WLAN Mesh Networks. Departamento de Ciencia y Computación de la Universidad de California, Los Angeles, California. U.S.A. Octubre de 2004. Disponible en: <http://www.coblitz.codeen.org>
- [9] White Paper: Wireless Spanning Tree. Disponible en: <https://www.educnet.decom-uv.cl/educnet/uploads/Spanning%20Tree.pdf>
- [10] SOLARTE, P., AGREDO, G. Modelo de Trabajo para el Diseño y la Implementación de redes Wi-Fi en malla como Solución de Acceso Banda Ancha en Zonas Rurales. Tesis. FIET. Universidad del Cauca, 2008.
- [11] Alcaldía de Piendamó "Plan de Ordenamiento territorial", 2005
- [12] MARTINEX, Simo. Dulcey, A. Rendon, F. Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales. Documento PDF disponible en: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=18&resId=0&materialId=paper&confId=12>