

Diseño e implementación de una red Mesh sobre UHF para sistemas de emergencia

Design and implementation of a Mesh network over UHF for emergency systems

Liecken Rodríguez Grosso
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
lieckenr@hotmail.com

Holman Montiel Ariza
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
hmontiel@udistrital.edu.co

Tomando como referencia la necesidad del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE de hacer un monitoreo permanente en la ciudad de Bogotá, y más específicamente, en zonas con alta vulnerabilidad de desastre natural, tal como lo es, el deslizamiento de tierra, se pensó en realizar una red de comunicación para enviar mediciones captadas por sensores de vibración terrestre en zonas de alto riesgo de deslizamientos de tierra. Para lograr esto, se realizó un estudio de factibilidad tecnológica, con el fin de encontrar dispositivos electrónicos de telecomunicación que faciliten efectuar la conexión a una frecuencia específica en la banda UHF (300 MHz - 3 GHz), analizando diferentes factores, tales como: potencia de transmisión, capacidad de tráfico de datos, velocidad de transmisión, distancias de cobertura, directividad de antenas, latencias del tráfico, etc. Luego de llevar a cabo este estudio, evaluando tecnologías como WI-FI, Bluetooth y XBee, se logró determinar que la tecnología XBee es la más apropiada para efectuar la conexión, toda vez que cuenta con dispositivos que transmiten y reciben datos en una frecuencia específica dentro del rango de UHF utilizando protocolos como ZigBee o DigiMesh (una derivación de ZigBee) y se ajustan a los requerimientos de tasa de datos y distancias por cubrir, lo cual se ve reflejado en la optimización de recursos para el desarrollo del proyecto.

Palabras clave: Comunicación inalámbrica, frecuencia ultra alta, red de comunicaciones

Referencing the necessity of the Prevention Fund and Emergency FOPAE making a permanent monitoring in the city of Bogotá, and more specifically, in areas with high vulnerability to natural disasters, such as it is, the landslide was thought to perform a communication network to send captured by earth's vibration sensors in areas of high risk of landslides measurements. To accomplish this, we conducted a study of technological feasibility, in order to find electronic telecommunication devices that facilitate us to make the connection to a specific frequency in the band UHF (300 MHz - 3 GHz), analyzing different factors, such as transmission power, data traffic capacity, transmission speed, distance coverage, antenna directivity, traffic latency, etc. After conducting this study, evaluating technologies such as WI-FI, Bluetooth and XBee, it was determined that the XBee technology is most appropriate for connection, since it has devices that transmit and receive data at a specific frequency within the UHF range using protocols such as ZigBee or DigiMesh (a derivation of ZigBee) and conform to the requirements of data rate and distance to cover, which is reflected in the optimization of resources to the project.

Keywords: Communication network, uhf, wireless communication

Introducción

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE tiene como misión dirigir, coordinar y orientar el Sistema Distrital de Gestión de Riesgos SDGR y promover políticas, normas, planes, programas y proyectos con el fin

de reducir los riesgos para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población de Bogotá (Escobar, 2009).

En las temporadas invernales de Bogotá, se presentan deslizamientos de tierra en localidades colindantes con la zona montañosa u oriental de la ciudad, dejando a su paso diferentes estragos como el derrumbamiento de casas, evacuación de cientos de familias de sus hogares, infinidad

de pérdidas materiales, y aún más importantes, pérdidas humanas.

Esta situación con el paso del tiempo ha empeorado, debido a que por diferentes factores como la explosión demográfica, el conflicto interno colombiano, entre otros, cada vez más personas construyen hogares en lugares de la ciudad con alto riesgo de deslizamiento, sin tener en cuenta las posibles estrategias de control territorial establecidas en la ciudad de Bogotá.

De acuerdo con la misión del FOPAE, la problemática surge por la necesidad de supervisar constantemente la ciudad de Bogotá y, con mayor precisión (en esta investigación), de detectar deslizamientos de tierra antes de que este tipo de eventos afecten principalmente personas y bienes, con el fin de prevenir las pérdidas.

Si bien en el país hay sistemas de detección de movimientos de tierra, en la actualidad no existe un sistema que pueda ser controlado por el FOPAE para alarmar a los residentes de un sector propenso a deslizamientos de tierra cuando un evento de este tipo sea detectado. Es decir, el FOPAE no cuenta con la información en tiempo real sobre la presencia de un movimiento terrestre. Por consiguiente, el FOPAE, buscando la manera de prever estos movimientos de tierra, y con el fin de actuar oportunamente ante la comunidad mediante alertas y desalojos, pretende implementar un centro de monitoreo de zonas en condición de vulnerabilidad de deslizamiento de tierras, utilizando herramientas tecnológicas que midan las vibraciones terrestres en diferentes puntos de la ciudad, y de esta manera mitigar los daños en caso de presentarse un evento de este tipo.

El FOPAE instalará sensores de vibración terrestre en algunas zonas de Bogotá con mayor probabilidad de deslizamientos. Con el fin de colaborar con el propósito del FOPAE, la labor de esta investigación se centra en tomar los datos enviados por los sensores ubicados en diferentes puntos de la ciudad y enviarlos a la central de monitoreo controlada por el FOPAE. Para ello se elabora una red de comunicación confiable y estable, utilizando dispositivos con capacidad de

recibir y transmitir los datos obtenidos por los sensores de vibración terrestre.

Este artículo documenta el marco de referencia tenido en cuenta para la elaboración del proyecto, los dispositivos utilizados con sus características y los resultados obtenidos tras efectuar pruebas en diferentes condiciones. Al analizar las necesidades de comunicación, así como las bandas de frecuencia y las tecnologías existentes (Wi-Fi, Bluetooth y XBee), se determinó que la tecnología XBee sería la más apropiada para efectuar la conexión. Bajo dicha selección, y profundizando en el estudio de la tecnología XBee, se encontraron cuatro frecuencias de funcionamiento de los dispositivos: 2.4 GHz, 900 MHz, 868 MHz y 865 MHz (Labiod, Afifi, y de Santis, 2007). Esto brinda un amplio rango de selección, el cual, fue filtrado por aspectos como: ocupación del espectro, permisos legales y potencias máximas permitidas en Colombia (Congreso de Colombia, 2009).

Fue así que finalmente se seleccionó el módulo de comunicación de datos XBee-PRO 900HP. Primero debido a la restricción que se tiene legalmente para utilizar las frecuencias de 868 MHz y 865 MHz, y segundo, a la gran cantidad de dispositivos y tecnologías existentes compartiendo la banda de los 2.4 GHz, con lo cual se pensó que el espectro radioeléctrico que se vería más libre de interferencias estaría ubicado en la banda de los 900 MHz.

Metodología

Estudio tecnológico

Luego de realizar un estudio de factibilidad tecnológico con el fin de encontrar la tecnología y los dispositivos que mejor se ajusten a las necesidades de desarrollo del proyecto, se seleccionó la tecnología enmarcada bajo el estándar IEEE 802.15.4, ya que dentro de sus bondades se encuentra un balance entre bajo consumo de energía (debido a bajas tasas de datos), y un amplio rango de cobertura física para los enlaces y conformación de la red de datos, esto sustentado en los requerimientos de bajo flujo de datos, apoyado en distintos protocolos de comunicación, como son:

- ZigBee, el cual está diseñado específicamente para bajo flujo de datos y aplicaciones de baja potencia.
- DigiMesh, el cual es un protocolo propietario Digi®, y además de brindar las mismas características de ZigBee, facilita la labor de configuración de los nodos e incrementa la factibilidad de uso en ambientes donde la cantidad de fallas de un nodo Router hace que la red presente muchos inconvenientes.

Protocolos de comunicación

ZigBee. El protocolo ZigBee define tres tipos de nodos: Coordinadores, Enrutadores y dispositivos finales, con el requerimiento de un coordinador por red. Mientras todos

Fecha recepción del manuscrito: Agosto 29, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Septiembre 22, 2014

Liecken Rodríguez G., Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Holman Montiel Ariza, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Esta investigación fue financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: Holman Montiel Ariza. Email: hmontiela@udistrital.edu.co

los nodos pueden enviar y recibir datos, hay diferencias en los papeles específicos que juega cada uno (Fig. 1).

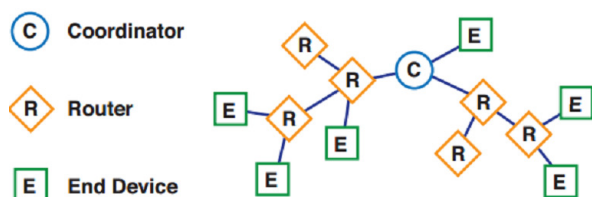


Figura 1. Red ZigBee (Digi International, 2008).

- **Coordinadores:** son los más capacitados de los tres tipos de nodos. Hay exactamente un coordinador en cada red y este es el dispositivo que establece la originalidad de la red. Está habilitado para almacenar información sobre la red, incluyendo claves de seguridad.

- **Enrutadores:** actúan como nodos intermediarios, entregando datos de otros dispositivos.

- **Dispositivos finales:** pueden ser dispositivos de baja potencia. Tienen bastante funcionalidad para hablar sobre sus padres (Coordinador y Enrutador) y no pueden entregar datos de otros dispositivos. Esta funcionalidad reducida permite para su potencial, reducir su costo.

ZigBee ofrece estas ventajas:

- Estándar abierto con interoperabilidad entre fabricantes.

- Opción de bajo costo, funciones reducidas en nodos finales.

Nodos DigiMesh. DigiMesh cuenta únicamente con un tipo de nodo, como una red homogénea. Todos los nodos pueden enrutar datos y son intercambiables. No hay una relación padre-hijo. Todos pueden ser configurables como dispositivos de baja potencia (Fig. 2).

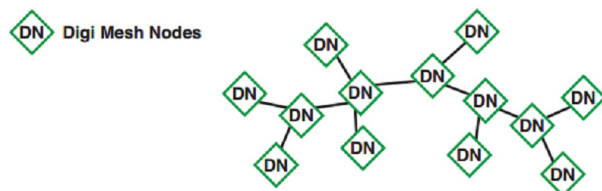


Figura 2. Red DigiMesh (Digi International, 2008).

Otros puntos importantes de comparación

Enrutadores durmientes. Permitir a un nodo dormir reduce el consumo de energía, lo cual es especialmente útil para nodos que son alimentados con batería. Normalmente, ZigBee permite dormir a dispositivos finales, pero no a coordinadores ni enrutadores. DigiMesh permite esta opción a todos los nodos, y de este modo incrementar la vida de la batería (Digi International, 2008).

Dormir es permitido por sincronización de tiempo. Algunos sistemas requieren un Gateway o coordinador para establecer el tiempo de sincronización. Una ventaja significativa de DigiMesh es que elimina un único punto de falla asociado con la entrega de datos en un coordinador o Gateway. En cambio, DigiMesh establece la sincronización de tiempo a través de la nominación y procesos de elección, habilitando la red para un funcionamiento autónomo.

Diferencias adicionales. Ya que ZigBee es un estándar abierto, este ofrece el potencial para la interoperabilidad con dispositivos hechos por diferentes fabricantes. Esto provee la disponibilidad de tener *en el aire* actualizaciones de firmware. Además, ZigBee brinda perfiles establecidos para aplicaciones comunes como el manejo de energía y controles de luz. Una buena selección de herramientas de soporte de diagnóstico, como paquetes de *sniffers* RF, están también disponibles (Digi International, 2008).

DigiMesh, como un protocolo propietario, es optimizado para un más ajustado control de espacio de código y por lo tanto más espacio para el incremento de características. Digi-Mesh está disponible sobre un amplio rango de plataformas y más opciones de flujo de datos RF. Las tramas de carga son generalmente más largas, las cuales pueden mejorar el tráfico para aplicaciones que envían largos bloques de datos. Adicionalmente, DigiMesh utiliza un método simplificado de direccionamiento, el cual mejora la organización de la red y disparos de fallas (tabla 1).

En conclusión se puede decir que el protocolo que brinda mayores facilidades de manejo y mejores características de operación para la aplicación específica es el protocolo DigiMesh porque brinda facilidades como:

- Disponibilidad para dormir en todos los nodos, lo cual representa ahorro de energía y una gran ventaja en el caso de una implementación utilizando baterías.

- Simplicidad en la configuración de la red y su expansión, esto se puede traducir también en grandes facilidades para la adición de algún nodo futuro en la red.

- Redes Mesh más robustas (sin dependencias padre/hijo), es decir, que según la necesidad, se puede llegar a tener miles de dispositivos trabajando en la misma red.

- Opciones de rango amplio, mas de 64 kilómetros para cada salto. Con lo cual se obtiene una amplia zona de cobertura del sistema o red.

- Tramas de carga largas.

Topología de red

De las topologías de red en las que puede trabajar el módulo XBee-PRO 900HP, la más apropiada para aplicar en el Centro de Monitoreo del FOPAE es la topología malla o Mesh (de su significado en inglés), toda vez que permite interconexión entre nodos y su confiabilidad es alta, puesto

Tabla 1

Cuadro comparativo (Digi International, 2008).

	ZigBee®	DigiMesh
Tipos de nodo, Beneficios	Coordinadores, Enrutadores, dispositivos finales. Dispositivos finales menos costosos por su reducida funcionalidad.	Un tipo, homogéneo. Mayor flexibilidad para expandir la red. Configuración de red simplificada. Incrementa la confiabilidad en ambientes donde los enrutadores pueden ir y venir debido a interferencias o daños.
Enrutadores durmientes, vida de la batería	Solamente dispositivos finales pueden dormir.	Todos los nodos pueden dormir. No un único punto de falla asociado con la entrega de datos sobre un Gateway o coordinador para mantener la sincronización de tiempo.
Actualizaciones de firmware	si	No programado comúnmente.
Opciones de amplio rango	Muchos dispositivos ZigBee tienen un rango de menos de 3.2 Kilómetros por cada salto	Disponible sobre XTend™, con un rango mayor de 64 Kilómetros para cada salto.
Carga, Tráfico	Arriba de 80 bytes	Arriba de los 256 bytes, dependiendo del producto. Tráfico mejorado para aplicaciones que envían lar-
		gos bloques de datos.
Tamaño del código	Más largos. Menos salas para el incremento de las características.	Más pequeños (alrededor de medio ZigBee PRO). Más salas para incrementar sus características.
Frecuencias soportadas y flujo de datos RF	Predominantemente 2.4 GHz (250 Kbps). 900 MHz (40 Kbps) y 868 MHz (20 Kbps) no disponible ampliamente.	900 MHz (10, 125, 150, 200 Kbps). 2.4 GHz (250 Kbps)
Seguridad	Encriptación AES. Puede bloquear redes y prevenir otros nodos que se quieran unir.	Encriptación AES.
Interoperabilidad	Potencial para interoperabilidad entre fabricantes.	Propietario
Tolerancia a la interferencia	DSSS	900 MHz: FHSS. 2.4 GHz: DSSS
Direccionamiento	Dos capas. Dirección MAC (64 bit) y dirección de red (16 bit)	Dirección MAC únicamente (64).
Mantenimiento	Más Sniffers y herramientas de diagnóstico disponibles en el mercado.	El direccionamiento más simple puede ayudar en el diagnóstico de problemas y configuración de la red.

que la caída de un solo nodo no compromete la totalidad de la red.

Características de topología Mesh en módulo XBee-PRO 900HP (Digi International, 2014).

- *Self-healing* (Auto-sanación): Cualquier nodo puede entrar o salir de la red en cualquier momento sin que la red falle en su totalidad.

- *Peer-to-peer architecture*: No se necesita jerarquización.

- *Quiet Protocol*: La sobrecarga de enrutamiento se reducirá mediante el uso de un protocolo reactivo similar a AODV.

- *Route Discovery* (Descubrimiento de ruta): En lugar de mantener un mapa de la red, las rutas serán descubiertas y creadas sólo cuando sea necesario.

- *Selective acknowledgements* (reconocimientos selectivos): Sólo el nodo de destino responderá a las solicitudes de ruta.

- *Reliable delivery* (Entrega confiable): Entrega fiable de datos se lleva a cabo por medio de acuses de recibo.

- *Sleep Modes* (Modos de Espera): Modos de baja potencia con sincronización de activación son soportados con esperas variables y tiempos de activación.

Transmisión de datos. La transmisión confiable de datos mediante la utilización de red Mesh se lleva a cabo utilizando reintentos y reconocimientos. El número de reintentos de la red de malla se determina por el parámetro *MR* (red de malla reintentos). Los paquetes de datos RF se envían hasta *MR + 1* veces a través de la ruta de la red, y los *ACK* (reconocimientos) se transmiten por el nodo receptor tras la recepción. Si un *ACK* de red no se recibe dentro del tiempo que le tomaría para que un paquete atraviese la red en dos ocasiones, se produce una retransmisión.

Enrutamiento. Un módulo dentro de una red Mesh es capaz de determinar rutas confiables utilizando algoritmo y tabla de enrutamiento. El algoritmo de enrutamiento utiliza un método reactivo derivado de AODV (Ad-hoc a petición de vector de distancia). Una tabla de enrutamiento asociativo se utiliza para asignar una dirección de nodo de destino a su próximo salto. Enviando un mensaje a la siguiente dirección de salto, bien sea que el mensaje llegue a su destino o sea remitido a un router intermedio que enruta el mensaje a su destino. Un mensaje con una dirección de difusión se transmite a todos los vecinos. Todos los routers que reciben el mensaje retransmitirán el mensaje *MT+1* veces y, finalmente, el mensaje llegará a todos los rincones de la red. El rastreo de paquetes impide que un nodo reenvíe un mensaje de difusión más de *MT+1* veces.

Configuración del XBee-PRO 900HP

Uno de los parámetros configurables más importantes del dispositivo es el Firmware del dispositivo. Con este parámetro se podrá definir básicamente la tasa de envío de

datos y la potencia de transmisión. Allí se podrá seleccionar entre Firmware de 200 Kbps o 10 Kbps. Cabe anotar que la variación en el rango de cobertura es significativo, teniendo (según el fabricante) alcances desde 305 m a 15.5 Km.

A continuación se encuentran diferentes opciones de configuración de los módulos, pero únicamente se hará mención de los parámetros que se pueden configurar y que ayudarán a establecer una comunicación conformando una red.

- Sección *MAC/PHY*

1. *HP* Preamble ID: puede ser cambiado para hacer que un grupo de radios no interfieran con otro grupo de radios en la misma vecindad.

2. *ID* Network ID: puede ser cambiado para mantener más lejos a los radios de la interferencia de otros equipos. Este ID debe coincidir después de que el patrón del preámbulo haya coincidido y la trama MAC se haya recibido. Viene por defecto con un valor de 7FFF.

3. *PL* Power Level: fija el nivel de potencia de transmisión. El nivel de potencia puede ser reducido del máximo, para reducir la corriente de consumo o para hacer pruebas.

4. *RR* Unicast Retries: este parámetro especifica el número de veces que un radio transmisor tratará de obtener un *ACK* del radio receptor, cuando envía un paquete.

5. *MT* Broadcast Multi-Transmits: este parámetro especifica el número de veces que un paquete de Broadcast es transmitido repetitivamente. Esto agrega redundancia que se traduce en confiabilidad.

- Sección *Network*

1. *CE* Routing/Messaging Mode: configuración del modo de operación del módulo.

2. *BH* Broadcast Hops: los saltos de transmisión para transmisión de datos broadcast. Fijar en cero para el radio máximo, si *BH* es fijado en un valor más grande que *NH*, entonces el valor de *NH* será utilizado.

3. *NH* Network Hops: el número máximo de saltos esperados a ser vistos en la ruta de la red. Este valor no limita el número de saltos permitidos, pero es utilizado para calcular intervalos de espera para acuses de recibido de red. Este parámetro es de suma importancia para el diseñador de la red, pues de este número, depende la comunicación y buen funcionamiento de la red, ya que un mal cálculo influiría en una posible inundación de un mismo paquete en el sistema, porque el dispositivo fuente no recibe un *ACK* de recibido y procede a reenviar el mensaje la cantidad de veces que se haya configurado en el parámetro *RR*. Por ejemplo, un XBee espera (un acuse de recibido) un tiempo igual a dos veces el tiempo que le toma a un paquete atravesar toda la red, es decir, si el dispositivo está trabajando con un firmware que realice una transmisión punto a punto de un paquete en 100 ms y el tamaño total de la red es de un salto, el dispositivo esperaría el *ACK* 200 ms para retransmitir su

paquete, proceso que realizará el número de veces que se le haya configurado en *RR*.

- Sección *Addressing*

1. *SH* Serial Number High: Los 32 bits superiores de la dirección única IEEE 64-bit del módulo.
2. *SL* Serial Number Low: Los 32 bits inferiores de la dirección única IEEE 64-bit del módulo.
3. *DH* Destination Address High: Los 32 bits superiores de la dirección de destino de 64-bits. Cuando se combina con *DL*, esta define la dirección de destino para la transmisión en modo transparente.
4. *DL* Destination Address Low: Los 32 bits inferiores de la dirección de destino de 64-bits. Cuando se combina con *DH*, *DL* define la dirección de destino utilizada para la transmisión en modo transparente. En esta opción de configuración, se va a ingresar en cada uno de los dispositivos ubicados en los nodos de medición, la dirección del módulo ubicado en la central de procesamiento de datos, con el fin de *apuntar* los demás dispositivos hacia este. Esa dirección, compuesta por *Address High* y *Address Low* se puede encontrar al reverso de cada dispositivo como se puede ver en la Fig. 3.



Figura 3. Dirección Física del dispositivo.

Como una de las grandes ventajas de la topología implementada, junto con la tecnología seleccionada, es la facilidad que tiene la red misma para enviar los paquetes a pesar de la pérdida de un enlace. Se puede pensar en las diferentes opciones que tendría un dispositivo *n* que haya perdido su enlace con la central para lograr comunicarse con dicha central de datos a pesar del percance (Fig. 4 y Fig. 5).

Con estos parámetros se puede construir la red, definiendo algunas funciones como la cantidad de saltos que puede dar un mensaje para llegar a su destino, tiempos de espera para acuses de recibo, modo de operación de los módulos y direccionamiento para el envío de mensajes *Unicast*, según sea la necesidad.

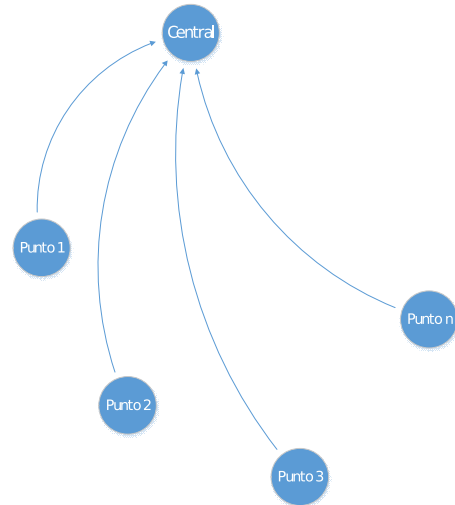


Figura 4. Modelo de red.

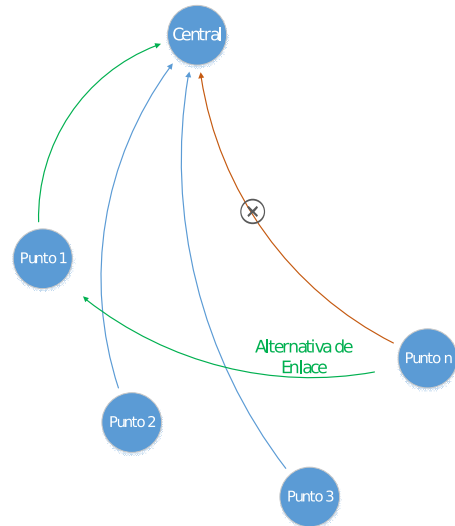


Figura 5. Falla en enlace.

Resultados

El enlace de comunicación se simuló con la ayuda de la herramienta *Radio Mobile*, de donde se realizó una comunicación entre el cerro de Sierra Morena y la Universidad Distrital Facultad Tecnológica. La ubicación de los dispositivos se muestra en la Fig. 6, donde se observa el módulo ubicado en la montaña y se denomina *cerro*, el cual se puede utilizar como un repetidor debido a la ubicación respecto al nodo *UD* y los posibles nodos que se ubiquen posteriormente a lo largo de la montaña. Con esta simulación del enlace se puede observar la viabilidad de la conexión, puesto que si esta no cuenta con niveles de recepción de potencia por encima de los requeridos por los dispositivos, la línea que se encuentra entre los nodos sería de color rojo

y entonces se necesitaría reubicar la antena o buscar la altura más apropiada para poder lograr realizar el enlace.

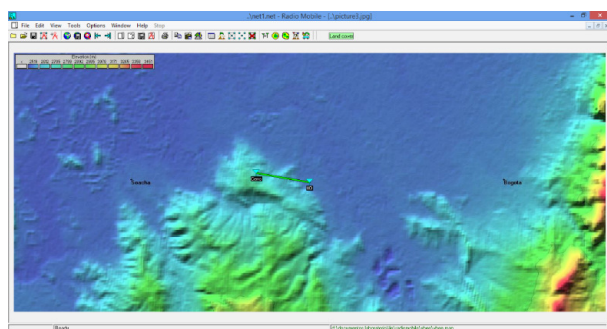


Figura 6. Plano del enlace.

A continuación se muestra la cobertura (en verde) del nodo *cerro* con la cual se puede validar las otras posibles ubicaciones para futuros nodos, además de una distribución de potencia a lo largo del plano, con la cual se pueden realizar cálculos para encontrar la mejor transferencia de datos con el nodo *cerro*, y finalmente lograr hacer llegar los datos a la central ubicada en el nodo *UD* (Fig. 7).

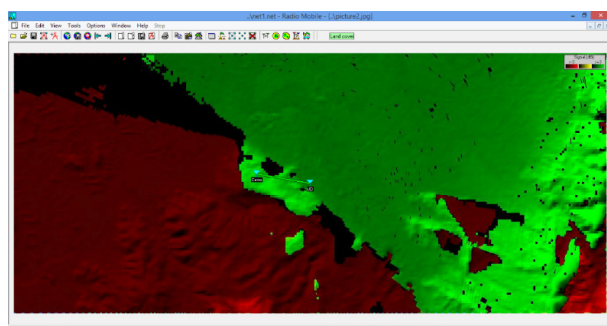


Figura 7. Área cobertura .

En la Fig. 8 se muestra un corte transversal del camino, utilizando Google Earth, donde se puede observar la distancia del enlace (2.12 km) y se podría hacer una idea del ambiente donde se va a trabajar mediante una foto satelital.

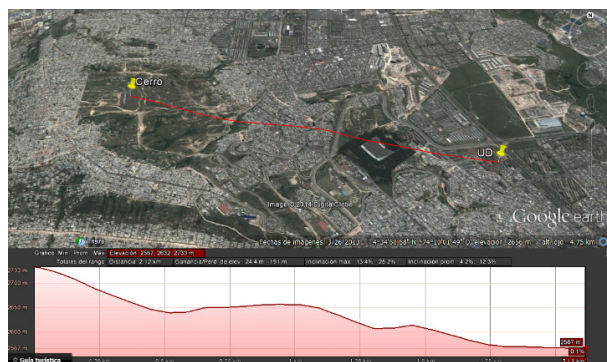


Figura 8. Foto satelital del enlace.

Adicionalmente se agregan imágenes del perfil de camino (Fig. 9) generado en el programa *Radio Mobile* y su herramienta denominada *Radio Link* (Fig. 10), la cual permite visualizar el estado del link, si es posible realizar dicho enlace o no, además de las pérdidas de espacio libre, distancia, nivel de recepción de potencia, distancia del enlace, zonas de Fresnel y altitud de los nodos, entre otros, concluyendo, gracias a la herramienta informática, que el enlace entre el nodo *cerro* y el nodo *UD* es óptimo y permite una comunicación sin mayores pérdidas y con gran confiabilidad.

Conclusiones

Se logra determinar que la tecnología que mejor se ajusta a los requerimientos o necesidades del sistema, es la tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4 ZigBee bajo un protocolo propietario denominado DigiMesh. La implementación del protocolo DigiMesh facilita la labor de configuración del dispositivo, limitando su parametrización al ingreso del direccionamiento y nivel de potencia requerido para su funcionamiento, obteniendo como resultado que el protocolo automáticamente determina las rutas de envío para lograr llegar a su destino.

Se encontró mediante un análisis teórico de tráfico, que el sistema permite un crecimiento mayor al 500% del parámetro inicial de 100 dispositivos en una misma red, puesto que, el factor de ocupación de un canal de comunicación es bastante bajo. Se Halló también que el comportamiento de los dispositivos en un ambiente compartido con tecnologías Wi-Fi y celular es óptimo, pues estas tecnologías no generan interferencias en los canales donde opera el módulo XBee-PRO 900HP.

Se optimizó el diseño con base en la relación de costos de los dispositivos, junto con el tráfico que transportaría el sistema, ya que esta tecnología incorpora el transporte de una baja cantidad de datos, buena capacidad de cobertura, buen precio de los módulos y finalmente un muy bajo consumo de energía comparado con otras tecnologías existentes en el mercado. Los equipos muestran un buen funcionamiento para implementaciones *indoor*, ya sea en ambientes con diferentes materiales como, hormigón, ladrillo, acrílicos, yesos, y adicionalmente bajo la inclusión de otros dispositivos electrónicos como computadoras, impresoras inalámbricas y diferentes objetos de oficina.

Referencias

Congreso de Colombia. (2009, Julio). *Ley 1341 de 2009 por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones tic, se crea la agencia nacional de espectro y se dictan otras disposiciones.*

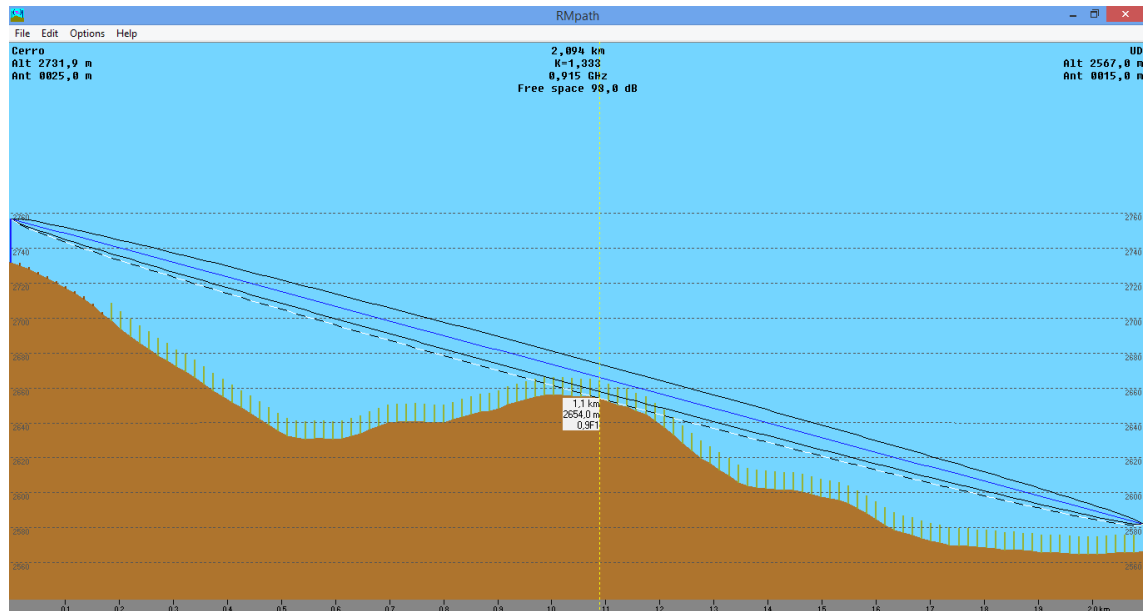


Figura 9. Perfil del camino.

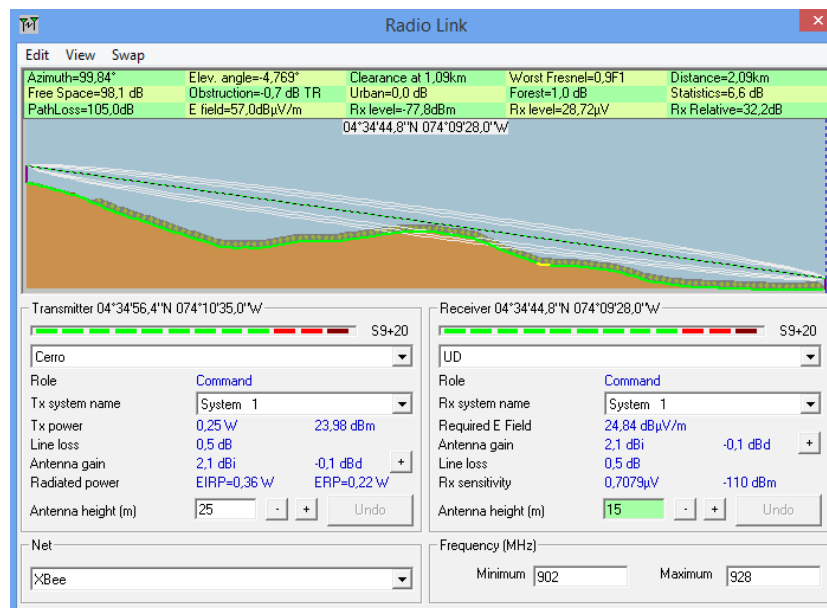


Figura 10. Radio Link.

Digi International. (2008). *Wireless mesh networking zigbee vs. digimesh*. (White paper)

Digi International. (2014, Febrero). *Xbee-pro 900hp/xbee-pro xsc rf modules*. (XBee-PRO RF Modules by Digi International)

Escobar, G. (2009). *Instrumentos para la gestión del riesgo en Bogotá*. DPAE Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - Secretaría de Gobierno.

Labiód, H., Afifi, H., y de Santis, C. (2007). *Wi-fi, bluetooth, zig-bee and wimax*. Springer. (ISBN 978-1-4020-5397-9)