

**REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD, SOCIALIZACIÓN Y
CAPACITACIÓN, PARA IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS DE
VOZ IP Y COMUNICACIONES CONVERGENTES EN LA REGIÓN DEL
SUMAPAZ**

DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA EN REDES RURALES INALÁMBRICAS PARA LA
REGIÓN DEL SUMAPAZ

MILTON JOSUÉ RÍOS RIVERA

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA ELECTRONICA
FUSAGASUGA
2014

**REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD, SOCIALIZACIÓN Y
CAPACITACIÓN, PARA IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS DE
VOZ IP Y COMUNICACIONES CONVERGENTES EN LA REGIÓN DEL
SUMAPAZ**

DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA EN REDES RURALES INALÁMBRICAS PARA LA
REGIÓN DEL SUMAPAZ

MILTON JOSUÉ RÍOS RIVERA

Trabajo para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Asesor
Msc. LEONARDO RODRÍGUEZ MUJICA
Ingeniero Electrónico

Co-asesores
Ms(c). CESAR AUGUSTO CASAS DÍAZ
Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA ELECTRONICA
FUSAGASUGA
2014

A mi madre Elisa Rivera Rubio,
a mi hermano Samuel Ríos Rivera;
con todo mi aprecio.

Y a todos aquellos que formaron parte de
este proceso con su apoyo incondicional.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. GENERAL.....	11
2.2. ESPECIFICOS:.....	11
3. MARCO TEORICO.....	12
3.1 ESTRUCTURAS DE SOPORTE PARA REDES RURALES INALÁMBRICAS.....	12
3.1.1 ESTRUCTURAS DE TORRES DE COMUNICACIÓN.....	12
3.2 SISTEMAS DE ELÉCTRICOS DE ALIMENTACIÓN Y PROTECCIÓN....	15
3.3 CONEXIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	16
3.3.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS AUTÓNOMOS FOTOVOLTAICOS.....	16
3.4 SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONVERSIÓN DE POTENCIA.....	20
3.4.1 INVERSOR.....	21
3.4.2 PROTECTORES DE LÍNEA.....	22
3.2 SISTEMAS DE PARARRAYOS.....	25
3.3 DISEÑO DE SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y PROTECCIÓN.....	27
3.3.1 DIMENSIONADO Y CÁLCULO DE CARGA.....	27
3.4 DISEÑO DE CONEXIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN.....	29
3.5 CALCULO DEL NÚMERO DE PANELES Y DE BATERÍAS PARA LA RED RURAL EN LA REGIÓN.....	31
4. PROBLEMA DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TOPOLOGÍA.....	33
4.1 REQUERIMIENTOS DEL PROBLEMA.....	34
4.2 COMPLEJIDAD DEL CÁLCULO.....	36
5. ECUACIÓN DE COSTOS.....	37
5.1. ECUACIÓN DE COSTOS: APLICADA A LA REGIÓN.....	38
6. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO.....	38
7. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.....	42
8. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA EN LA RED RURAL PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN LA REGIÓN DEL SUMAPAZ.....	43
8.1 CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA INICIAL.....	43
8.2 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA.....	44
8.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO.....	44
8.4 DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA.....	46
9. SIMULACIONES NUMERICAS.....	47
9.1 GENERACIÓN DE GRAFOS DE TOPOLOGÍA ALEATORIA.....	47
9.2 ALGORITMO BÁSICO O HEURÍSTICA SIMPLE.....	47
9.3 COMPARACIÓN CON LA HEURÍSTICA SIMPLE.....	48
10. ANALISIS DE RESULTADOS.....	49
10.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA DE RED 50	
10.2 CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA INICIAL.....	51
10.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA.....	52
10.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO.....	52

10.4	ALTURA MÁXIMA DE OBSTRUCCIÓN.....	53
10.5	GRAFO INICIAL.....	54
10.6	ALGORITMO REP-ALGO.....	55
10.7	APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN TC-ALGO.....	62
11.	CONCLUSIONES.....	67
	Bibliografía.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diseño torre ventada de elevación 30m (Romero, 2006).....	14
Figura 2	Sistema de puesta a tierra interconectado (de Minas y Energía, 2013)...	26
Figura 3	Cálculo de la altura de las torres en el fin de los puntos de enlace.....	35
Figura 4	Grafica que arroja la ejecución de la aplicación.....	42

Figura 5 Mapa de la topología inicial de la red.....	43
Figura 6 Altura de las antenas.....	45
Figura 7 Comparación Algoritmo Aproximado Vs Heurística Simple.....	49
Figura 8 Determinación de la altura intermedia máxima de un enlace.....	53
Figura 9 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño inicial de la topología grafo de entradaG	58
Figura 10 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño inicial de la topología grafo de entrada.....	59
Figura 11 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño elaborado por TC- ALGO.....	63
Figura 12 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño elaborado por TC- ALGO con repetidoras (verde).....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características según tipos de baterías.....	20
Tabla 2 Tiempo y tensión de contacto (de Minas y Energía, 2013).....	24
Tabla 3 Consumo modelo del cliente.....	28
Tabla 4 Consumo modelo de repetidora.....	28
Tabla 5 Consumo modelo cliente y repetidor.....	29

Tabla 6 Consideraciones de corriente y Potencia.....	29
Tabla 7 Dimensionado sistema solar.....	31
Tabla 8 Dimensionado número de baterías.....	33
Tabla 9 Dimensionado inversor.....	33
Tabla 10 Algoritmo de Heurística Simple.....	47

RESUMEN

La construcción de redes de comunicación rural presenta particulares desafíos sobre todo en el costo que conlleva establecerlas. Esto se debe en gran parte a las condiciones de la población rural, la cual es generalmente de bajo poder adquisitivo, además de presentar una dispersión alta, debido a la baja densidad

de población, lo que obliga, se tengan especiales consideraciones de cobertura, y en particular de costos al establecer una red de comunicación.

Un parámetro importante en el costo de redes rurales es la construcción de torres que soporten las antenas a la altura que permite establecer un buen enlace, este costo es en comparación mucho más grande que los costos atribuidos a los equipos de comunicación, por lo tanto se le tiene especial atención.

En este trabajo se explican las condiciones de las que depende la altura de las torres que soportan las antenas y la factibilidad de usar, en cuestión de costos mástiles tubulares o torres de acero venteadas (S.A.C, Torres Ventadas, s.f.) en busca de definir el problema de costo mínimo de las torres.

Se desarrolla el algoritmo Panigrahi-Duttat-Naiswal-Naidu-Rastogi (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) de optimización de costos que pretende solucionar el problema de la topología de red en zonas rurales, cuyo objeto es establecer la mejor altura posible de cada torre de comunicación que mantenga una relación costo beneficio óptimo. A partir de esto se realiza una simulación numérica del algoritmo planteado y un algoritmo de heurística simple, con el fin de compararlos de esta forma se hace evidente un mejor desempeño en cuanto a reducción de costos.

Palabras claves: Algoritmo, Optimización de costos, Redes rurales, Teoría de grafos, Topología de red.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de comunicación han alcanzado una preponderancia en la actividad humana del desarrollo, manipulación y traspaso de la información. Actualmente el vínculo entre el hombre, la cultura y las telecomunicaciones es ineludible, tanto que la cultura se adapta a los nuevos procesos informáticos, y también, los moldea según requerimiento que se hacen necesarios para el continuo estilo de vida contemporáneo. La búsqueda de nuevas aplicaciones y servicios que hagan

útil las redes de comunicación para la actividad humana permitió la creación de las comunicaciones de servicios. Los servicios se estructuran a partir de las necesidades de una población objetivo y se disponen de recursos suficientes para responder a una necesidad humana, en este caso de acceso y consumo de información, en todas sus formas, tanto datos concretos en forma de texto, información audiovisual y los servicios de transmisión de información en tiempo real. Esto abre paso el desarrollo de las redes de servicios convergentes, integrando e una sola red servicios en tiempo real (telefonía IP, Voz sobre IP, videoconferencia, etc.) y de transmisión de datos sobre IP.

El acceso a estos servicios permite conectar a las comunidades con el mundo globalizado. En la literatura académica de la actualidad un tema ampliamente tratado es el de una conexión verdaderamente global que integre también a los comunidades rurales, llevando servicios convergentes a lugares remotos y de difícil acceso que mejoren la calidad de vida mediante el acceso de las comunicaciones y brindar acceso a servicios como telefonía sobre IP, tele asistencia y telemedicina (Rendón, Ludeña, & Martínez, 2011), transmisión de datos y acceso a Internet (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008).

Las adversas condiciones económicas y de acceso a las tecnologías de la información, hacen que la Universidad de Cundinamarca como promotor de desarrollo en la región, por medio del grupo de investigación GIGATT presente una alternativa mediante el proyecto denominado *“Realización del estudio de factibilidad, socialización y capacitación, para implementación de infraestructuras de voz IP y comunicaciones convergentes en la región del Sumapaz”* (Cesar, Leonardo, & Luis, 2013), que pretende evaluar la viabilidad y conseguir alternativas económicas de diseño e implementación de redes, en este aspecto este trabajo busca manipular los principales costos involucrados en la implementación física de redes de comunicaciones rurales.

Este trabajo se realiza con el fin de presentar una alternativa económica de diseño de la infraestructura de red requerida en el desarrollo de redes rurales, como objetivo del plan de diseño físico de red mediante el uso del algoritmo de optimización en la construcción de la topología. Para tratar de manera formal el problema se realiza una descripción de la topología por medio del uso de grafos. Es mediante esta estructura de datos que se elabora el procesamiento computacional del problema y de la solución que aquí se trata. Se establecen las características de variación de costo con referencia a la altura de las torres de comunicación y la ecuación de costos contextualizada a la región.

Luego de ello, se desarrolla el algoritmo que permite establecer tanto la topología de red óptima en cuanto a costos, como las alturas que permiten que una ecuación de costos de las alturas de las torres sea mínima. A partir de la información recopilada (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008), se puede determinar las condiciones necesarias para obtener el algoritmo que

permita una aproximación bastante buena en cuanto al problema de planificación de costos de estructuras de soporte (torres) de antenas de comunicación. Luego, se realiza una simulación numérica que permite comparar el algoritmo con la heurística simple.

Por último se establece un grafo inicial que representa la red rural del Sumapaz, la cual está conformada por 10 redes inalámbricas conectadas por puntos de acceso en las cabeceras municipales, se utiliza el algoritmo de D. Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu y Rastogi TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) y el de heurística simple para optimizar la topología y retornar el valor aproximado de la infraestructura de soporte para la red. Los valores de obstrucción se toma de mapas satelitales de elevación del terreno. Luego se establecen por medio del algoritmo REP-ALGO las posiciones ideales para la ubicación de antenas repetidoras, con el proposito de obtener la conexión total de los nodos iniciales de la red.

Anexo 1 Acta de inicio y de actividades del auxiliar de investigación que llevo a cabo el proceso.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Diseñar la infraestructura tecnológica requerida para la prestación de servicios IP a nivel de datos, voz y video en la Región del Sumapaz.

2.2. ESPECIFICOS:

- Plantear el problema de optimización de costos de las torres según su altura y su complejidad computacional.
- Desarrollar un algoritmo que optimice los costos a partir de la altura de las torres (Estructura de soporte y simulación).
- Aplicar el algoritmo de optimización de costos a partir de la altura de las torres (Estructura de soporte) en la topología de la red del proyecto.
- Comparar los resultados del algoritmo de optimización de costos a partir de la altura de las torres (Estructura de soporte) y el diseño previo en cuanto a costos.

3. MARCO TEORICO

3.1 ESTRUCTURAS DE SOPORTE PARA REDES RURALES INALÁMBRICAS

Dentro del desarrollo de redes rurales el diseño la infraestructura es relevante sobre todo en la especificación de parámetros de seguridad, eficacia y uso adecuado de los diferentes recursos. En este trabajo se elabora una breve descripción de las estructuras de soporte para antenas o torres de comunicaciones que comúnmente se usan, se plantean modelos de torres (sección 1) y se realiza un diseño preliminar de los sistemas de alimentación eléctrica, según sea necesario por las condiciones de cada nodo en la red se pueden usar un sistema de conexión a la red de distribución eléctrica o la implementación de sistemas fotovoltaicos.

3.1.1 ESTRUCTURAS DE TORRES DE COMUNICACIÓN

Dentro de las estructuras usadas para torres de comunicaciones están; los monopolos o mástiles tubulares, los cuales son estructura fijas que se pueden usar eficazmente para alturas menores a 20 m y para cargas pequeñas; las torres rendadas se emplean para alturas de entre 10 y 60 m; y las torres auto-soportadas que se usan para alturas superiores a 10 m y para cargas grandes. Estas últimas están fuera de discusión de este trabajo, puesto que los costos suelen ser, por mucho, superiores, además las necesidades de carga y altura permiten evitar el uso de estas.

En el contexto del proyecto se aplican las estructuras de torres ventadas y mástiles tubulares por su facilidad de instalación, así como, su comparable menor costo con referencia a las torres auto soportadas, además el peso de los equipo IEE 802.11 resulta ser mínimo junto con el de las antenas directivas utilizadas.

3.1.1.1 Mástiles o monopolos

Estos son elementos fáciles de montar, ligeros y económicos, se conforman de tubos de metal: aluminio o acero, con tratamiento anticorrosivos como son el galvanizado en caliente o recubrimientos con esmaltes impermeables (resina epóxica) (Romero, 2006) según aparece en la norma de estructuras de soporte para telecomunicaciones ANSI TIA/EIA 222.

Es importante que la cimentación permita obtener la mayor rigidez posible, evitando desplazamientos o derivas grandes que comprometan la estabilidad estructural. Las características conductivas de los mástiles, por lo general, no evitan la aplicación de sistema de puesta a tierra, por ello se deben agregar medios independientes para cumplir esta tarea (Romero, 2006)

Gracias a su interior vacío permite la protección del cableado necesario para la alimentación y transmisión de información a las antenas, así como, la conexión de puesta a tierra y del sistema de pararrayos.

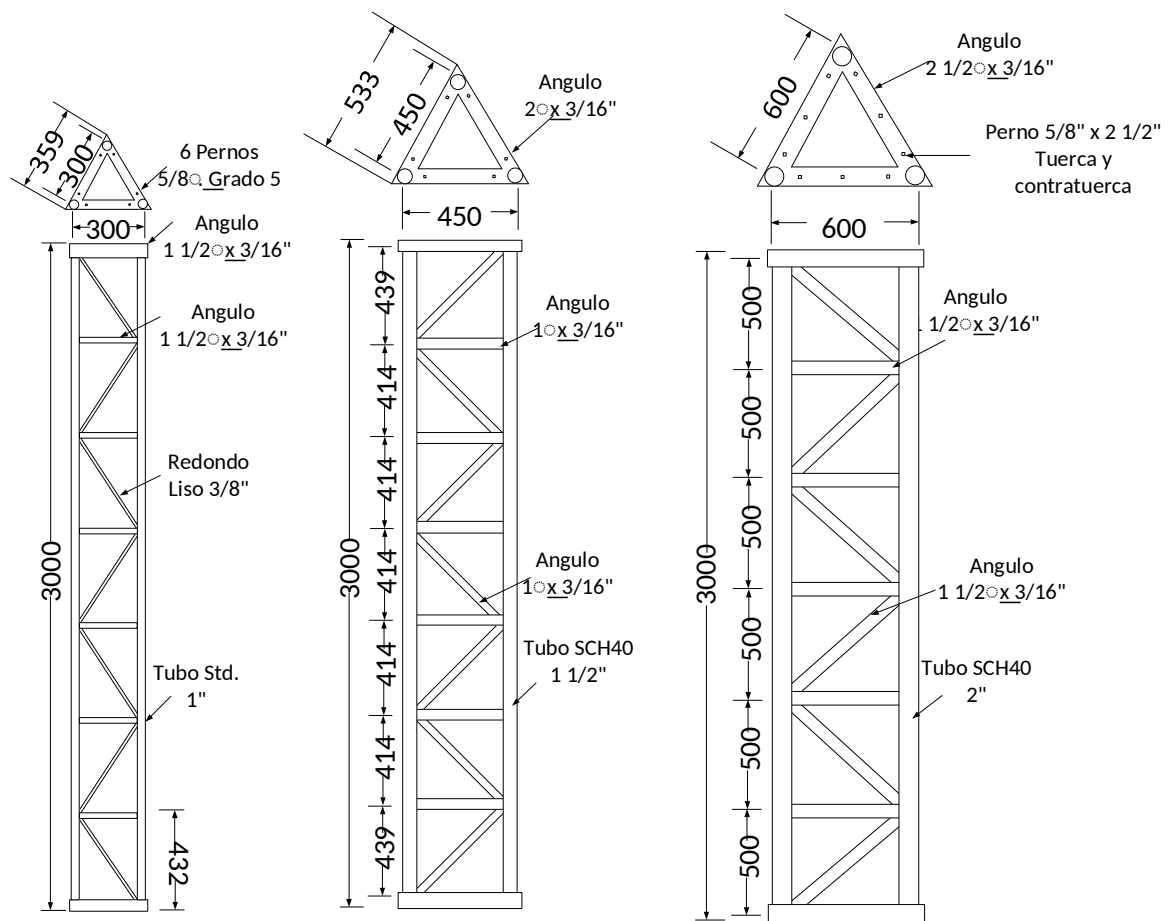
3.1.1.1.1 TORRES CON RIGIDEZ ASISTIDA POR DRIZAS O VENTADAS

Se construyen a partir de arreglos triangulares o cuadrangulares de tubos, mientras que la rigidez es conseguida por el anclaje de drizas entre la punta de la torres (o altura específica de la torre) y el suelo, también se hace necesaria la construcción de una base cimentada en concreto que tiene como función soportar el peso de la estructura. Las drizas, comúnmente se instalan en números impares con un mínimo de tres (de Minas y Energía, 2013)

Son estructuras esbeltas (cuya altura es varios órdenes de magnitud superior a su diámetro de sección). Su construcción e instalación se realiza por medio de secciones, las cuales suelen ser de 2,4 m o 3 m, con un peso que no exceda los 30 kg, lo que facilita que sea izado por un operario para su ubicación sobre el tramo anteriormente instalado. En caso de los materiales, con base en la disponibilidad y bajo costo se recomienda usar tubos de acero galvanizado en caliente con soldadura en arco para fabricar los tramos (Romero, 2006).

Debido a la baja conductividad de la estructura e necesario la ubicación de un sistema de puesta a tierra, el cual está compuesto de dos varillas conductoras de cobre o acero galvanizado de 5/8" no menores a 8 pies 2,5m, hincadas de manera adyacente a la base de la estructura y separada una de la otra 180°. Las varillas a tierra deben estar unidas al menos mediante un cobre desnudo estañado 6 AWG (5 mm) conectado al montante más cercano o a la base metálica de la estructura. En cada anclaje de rienda se debe instalar una varilla a tierra similar conectada a cada rienda en el anclaje (TIA/EIA-222, 1996). El sistema de protección contra rayos, tormentas eléctricas y descargas atmosféricas debe contar con un pararrayos en la punta de la torre y cablearse hasta un sumidero a tierra (preferiblemente distinto al sistema de puesta a tierra (Romero, 2006).

Figura 1 Diseño torre ventada de elevación 30m (Romero, 2006)



Otra consideración es la señalización luminosa, que permite cumplir la normatividad de aeronavegación, que exige que para torres mayores o iguales a 30m se debe contar con elementos que permitan la identificación de las torres, como son, señalizaciones luminosas intermitentes y colores de pintura que permitan la máxima visibilidad de la estructura y contraste con el medio.

Toda la teoría necesaria para realizar un diseño de ingeniería de estructuras de soporte para antenas de telecomunicación, puede encontrarse en el estándar TIA/EIA-222-F-G (TIA/EIA-222, 1996), publicado por la Telecommunications Industry Association (TIA) de los Estados Unidos. En este documento se encuentra la justificación y todo el compendio de fórmulas necesario para realizar un correcto estudio para la determinación de cargas para la torre (carga muerta, carga de hielo, carga del viento) y factores de seguridad (Romero, 2006).

En (Romero, 2006) se muestran los diseños de tres tipos de torres ventadas las cuales alcanzan determinadas altura (ver anexos):

- Tipo A. Alcanzan alturas menores e iguales a 30m. Para efectos de diseño en redes de comunicaciones rurales han de tenerse en cuenta para alturas

que sean mayor a las que se alcanzan con mástiles económicos, por lo tanto, este tipo de torres se implementa para altura mayores a 20m y menores a 30m.

- Tipo B. Alcanzan alturas menores e iguales a 60m, se utilizarán en este trabajo para alturas superiores a 30m y menores a 60m.
- Tipo C. Alcanzan alturas menores e iguales a 90m, se utilizarán en este trabajo para alturas superiores a 60m y menores a 90m.

Además de los tramos las estructuras, requieren de ciertos elementos que permitan y aseguren el perfecto funcionamiento, construcción y el garantizar los requerimientos de seguridad de la torre. Elementos como son:

- Cimentación. Se construye en concreto e hierro que se funde con la base de la torre, la cimentación debe estar enterada a una profundidad mayor a 3 pies, ya que su función es darle estabilidad y soporte a toda la estructura. Se realizan cimentaciones, también para sujetar las riendas que apoyan la estructura.
- Bases de torre. "La base de la torre será de sección triangular, de 400, 800 ó 1.200 mm de longitud según el tipo de torre, formada por 3 tubos de 3/4", 1" ó 1,5" de diámetro nominal, separados entre sí 300, 450 ó 600 mm respectivamente, con una cartela horizontal en la parte inferior de 1" x 3/16" para los tipos A y B, y 1,5" x 3/16" para el tipo C. En la parte superior se soldará horizontalmente una platina de 2" x 1/8", que sirve como soporte de toda la estructura de torre".
- Bases y planchas de anclaje. Estas permiten anclar la torre al suelo a través de rienda (cable de acero), las riendas van sujetas a una cimentación y a la torre por medio de grilletes.

3.2 SISTEMAS DE ELÉCTRICOS DE ALIMENTACIÓN Y PROTECCIÓN

El suministro de energía eléctrica es un requerimiento imprescindible en instalaciones de equipos de telecomunicación. Justificado por su relativo bajo consumo se hace útil la implementación de sistemas confiables que permitan la operatividad del sistema de telecomunicación en las 24 horas del día, debido a ellos frecuente el uso de fuentes fotovoltaicas de energía, sobretodo en sitios donde la red interconectada de distribución y transmisión resulta poco confiable o del todo inexistente. Sin embargo, el alimentar los equipos por medio de la red en ciertos casos resulta más eficaz, y facilita el alcanzar los requerimientos de confiabilidad de la instalación.

Para redes de comunicación rurales, existen dos tipo de sistemas de alimentación de energía eléctrica que permiten manejar y suplir las necesidades energéticas de los equipos y sistemas de telecomunicación de cada nodo en la red de comunicación. Estos dos tipos son la conexión a la red de distribución y

transmisión por medio de un punto de acceso cercano (que en algunos casos no se consigue), y los sistemas eléctricos autónomos fotovoltaicos.

3.3 CONEXIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Es común en redes inalámbricas rurales el uso de instalaciones eléctricas en lugares donde la red de distribución es fácilmente alcanzable o como parte de un circuito anexo a una instalación o acometida ya presente, este último en casos donde la energía demandada no es muy grande y la cercanía de las torres de comunicación a construcciones que cuentan con un servicio energía adecuado. En algunos casos dichas construcciones (viviendas, edificios, etc.) sostienen las torres o mástiles donde están los equipos de transmisión.

3.3.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS AUTÓNOMOS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos han pasado a ser uno de los principales sistemas de electrificación para redes de comunicación rural y en las últimas décadas han sido tema de investigación llegando a un importante grado de desarrollo. Esto debido a que el suministro eléctrico mediante la conexión a la red de distribución y transmisión no siempre se puede realizar ya sea por la falta de este o por condiciones particulares haciendo este servicio inseguro y poco fiable. Además el uso de hidrocarburos para la generación de energía eléctrica supone un aumento considerable en los costos a largo plazo.

Un diseño sistema fotovoltaico se puede analizar en tres componentes principales: las celdas fotovoltaicas, el sistema de baterías y los sistemas de regulación y conversión de potencia (Romero, 2006).

3.3.1.1 Las celdas fotovoltaicas

El funcionamiento de una celda o panel fotovoltaico se debe al efecto fotoeléctrico y a la teoría de semiconductores. Una celda fotovoltaica está compuesta por dos o más capas de material semiconductor por lo general de silicio, una capa dopada con un número de electrones de valencia mayor al silicio puro, conocida como semiconductor tipo N, y la otra capa se dopa con un número menor de electrones de valencia que el silicio puro, semiconductor tipo P. Cuando un fotón procedente de una fuente de energía luminosa incide directamente, con cierta energía, sobre el semiconductor tipo P este libera un electrón que cruza la capa del semiconductor pero este no logra regresar debido a que pasa a la capa tipo N. Así, la capa tipo N adquiere una diferencia de potencial con respecto a la capa tipo P, de forma que una malla de material conductor, se conectan a cada capa semiconductor aisladamente, y esta a su vez a un elemento consumidor de energía eléctrica se consigue la circulación de una corriente de tipo continuo (Romero, 2006).

Las celdas fotovoltaicas tienen parámetros importantes de diseño, la corriente máxima, la tensión máxima, la potencia máxima y su eficiencia o rendimiento, estos valores los da el fabricante los cuales son dados para condiciones estandarizadas d temperatura 25°C y para una densidad de radiación incidente de 1kW/m². Este último depende de la tecnología de la celda fotovoltaica, las cuales se clasifican de esta forma en dos variantes:

- Celdas cristalinas. Estas a su vez se clasifican en poli-cristalinas y mono-cristalinas, mantienen por lo general una eficiencia del 20%.
- Celdas amorfas. Estas presentan una eficiencia no mayor al 12%, pero son más económicas que las cristalinas aunque su peso es mayor, lo cual puede ser determinante según requerimientos particulares de instalación (Romero, 2006).

Que se pueda obtener una eficiente conversión de energía depende, entonces, del tipo de panel que se usa, aunque esto no es del todo determinante, es importante conocer las características de densidad de radiación del lugar de la instalación. En un día soleado la energía irradiada por el sol alcanza 1kW/ m², en algunas zonas alto-andinas se puede obtener un valor mayor. Considerando lo anterior la potencia máxima convertida que se esperarías estaría entre 120 y 250W/m² para un día soleado. Además la eficiencia de las celdas depende, también, de la inclinación con que los rayos de sol son incidentes en ellas, en algunos casos se usan sistemas de seguimiento al sol, salvo que estos aumentan considerablemente el costo de todo en sistema. Se suelen usar instalaciones de paneles con inclinación fija, esto facilita su mantenimiento (Romero, 2006).

3.3.1.2 Sistema de baterías

Las baterías son elementos que acumulan energía de forma química, por medio del uso de dos electrodos de material conductor con una energía de conducción diferente, se transforma la energía química en eléctrica. Las baterías almacenan energía proveniente de los paneles en horas de exposición al sol y alimentan la carga en periodos de mal tiempo o de noche. También se logra entregar a la carga una intensidad de corriente mayor que la que se puede permitir la celda fotovoltaica (Romero, 2006).

Anexo 1 Reguladores o Controlador de Corriente

El regulador o controlador de corriente protege las bacterias al regular la carga de las mismas, y previene aumentos de corriente o sobre voltajes en la carga. Estas suelen conectar las bacterias, los paneles solares y las cargas.

Dicho controlador debe trabajar al voltaje de diseño del sistema fotovoltaico (generalmente 12 y 24 Vdc), así mismo, debe soportar la corriente máxima que solicitan la carga.

Los controladores presentan, por lo general, diferentes programaciones, donde se administra por tiempos definidos o, en algunos casos manualmente, el intervalo de descarga de las baterías y el consumo directo de energía por parte de la carga a las celdas solares (Romero, 2006).

3.3.1.3 Cálculo del número de paneles

Con el dimensionamiento del consumo se logra obtener el número de paneles solares que son necesarios según los requisitos de uso del sistema.

Para obtener el número de paneles se requiere tener un cálculo previa del consumo de energía necesaria para alimentar los sistemas en un día ($W \cdot \text{hora/día}$), dado por la letra L . Además es prudente adicionar ciertos valores que sean eficaces para salvaguardar las perdidas por ineficiencia de los sistemas comúnmente este parámetro se determina como el 10% de la energía demandada ($\eta\varsigma = 0,1$). También se suele agregar un factor de corrección del 1,3 (f_c) el cual previene la energía que se requiere tanto para el uso de los sistemas, como para la carga de las baterías. De tal modo que la energía total suministrada por el panel fotovoltaico (E_{gfv}) se determina así (Romero, 2006):

$$E_{gfv} = L \cdot (1 + \eta\varsigma) f_c$$

El número de paneles se determina, luego de obtener el valor de energía que ha de suministrar el panel fotovoltaico, de la siguiente manera:

$$\text{No. de paneles} = E_{gfv} / (P_{nom} \times (G_{dm} / G_{nor}))$$

Donde P_{nom} es la potencia nominal del panel seleccionado, G_{dm} es el valor de energía de radiación diaria incidente para el mes según la zona, y G_{nor} corresponde a la radiación de referencia la cual es de 1kWh/ m².

Además de esto es importante conocer el total de paneles mínimo en paralelo y el total de paneles en serie, los cuales permiten en dado caso, mantener un suministro ininterrumpido de corriente y un valor de voltaje determinado.

Para el número de paneles en paralelo se tiene en cuenta a la corriente necesaria para las sistemas de telecomunicación (I_{gfv}) y la corriente nominal de cada panel (I_{nom}). El número de paneles en paralelo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{No. de paneles ser} = V_{gfv} / V_{nom}$$

El número de paneles en serie determina el voltaje con el cual se suministrara la energía eléctrica al sistema, este cálculo corresponde a:

$$No.de\ paneles\ par = P_{gfv} / (P_{nom} No.de\ paneles\ ser)$$

Donde P_{gfv} es la potencia requerida, P_{nom} es la potencia nominal del panel seleccionado.

3.3.1.4 Sistema de baterías

Las baterías son elementos que acumulan energía de forma química, por medio del uso de dos electrodos de material conductor con una energía de conducción diferente, se transforma la energía química en eléctrica. Las baterías almacenan energía proveniente de los paneles en horas de exposición al sol y alimentan la carga en periodos de mal tiempo o de noche. También se logra entregar a la carga una intensidad de corriente mayor que la que se puede permitir la celda fotovoltaica (Romero, 2006).

3.3.1.5 Cálculo del número de baterías

Debido a que las baterías tendrán que mantener la energía suficiente para la alimentación de los sistemas en momentos donde la energía irradiada por el sol sea mínima o nula, se realiza el dimensionado de un conjunto de baterías (banco de baterías) teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La energía total necesaria para la alimentación de los sistemas L .
- Un valor estimado de corrección η_g , considerando las pérdidas.
- Los nodos de la red deben mantener un mínimo de autonomía. Es común que el mínimo de autonomía (N_{da}) se establezca en 2 o 3 días.
- No se deben descargar las baterías por encima del 80% ($P_{dmax} = 0,8$), tal que siempre mantengan un mínimo de carga del 20%, esto ayuda a mantener la vida útil de las baterías.

Resumiendo, el total de capacidad del banco (C_{nom} en Wh) de baterías es suficiente para mantener los sistemas alimentados por cada día de autonomía, evitando que las baterías se descarguen por encima del 80% de su capacidad de carga total.

$$C_{nom} = L \cdot (1 + \eta g)(N_{da}/P_{dmax})$$

La cantidad de baterías necesarias se calcula de la siguiente manera:

$$No\ de\ baterias = C_{nom}/(C \times V)$$

Donde C es la capacidad de carga de cada batería y V el voltaje nominal del modelo de batería elegido.

Tabla 1 Características según tipos de baterías

Tipo	Energía/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h	30%
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h	20 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2h-4h	25 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10%

3.4 SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONVERSIÓN DE POTENCIA

El regulador o controlador de corriente protege las baterías al regular la carga de las mismas, y previene aumentos de corriente o sobre voltajes en la carga. Estas suelen conectar las baterías, los paneles solares y las cargas.

Dicho controlador debe trabajar al voltaje de diseño del sistema fotovoltaico (generalmente 12 y 24Vdc), así mismo, debe soportar la corriente máxima que solicitan la carga.

Los controladores presentan, por lo general, diferentes programaciones, donde se administra por tiempos definidos o, en algunos casos manualmente, el intervalo de descarga de las baterías y el consumo directo de energía por parte de la carga a las celdas solares (Romero, 2006).

3.4.1 INVERSOR

El inversor permite la conexión de cargas que se alimenten de energía eléctrica alterna, al sistema fotovoltaico. Estos pueden dar un rendimiento hasta del 80%,

sin embargo como son sistemas controlados los cuales se manejan por medio de PWM, no suelen tener una eficiencia promedio alta, para efectos de diseño se utiliza una eficiencia del 50%, de manera que el uso de inversor duplicar el consumo de energía (Romero, 2006).

3.4.1.1 *Calculo de corriente para el inversor*

Un parámetro decisivo para la escogencia del inverso es la corriente que debe controlar, este cálculo se consigue por medio de la potencia consumida por los equipos en corriente alterna, así como el voltaje de diseño en corriente directa del diseño del sistema fotovoltaico. De esta manera en la siguiente ecuación permite calcular la corriente del inversor:

$$I_{AC} = 1,25 \cdot \frac{\sum P_{ac} / \eta_{in}}{V_{nom}}$$

Para esto V_{nom} es el la tensión del diseño, P_{ac} es la potencia de corriente alterna y η_{in} es la eficiencia del inversor (generalmente mayor a 0,9).

3.4.1.2 *Sistema integral de protección*

Este es el principal elemento dentro del sistema de protección eléctrica. Los sistemas de protección eléctrica pretenden evitar que descargas eléctricas de origen atmosférico, muy frecuentes en zonas rurales, no lleguen a producir daños en las personas y en los equipos, manteniendo la integridad tanto del personal como de los sistemas de comunicación. Los objetivos de un sistema de protección eléctrica son:

- Proteger y asegurar la vida humana.
- Proteger y asegurar los equipos electrónicos, garantizando la continuidad de operación.
- Compatibilidad electromagnética (reducción de los niveles de interferencia y contaminación electromagnética).

Para conseguir un sistema eléctrico que cuente con una protección la cual cumpla con los objetivos anteriores es necesario plantear un sistema de protección integral que se encargue de:

- Capturar la descarga atmosférica. El rayo es el más peligroso de los fenómenos eléctricos transitorios, dado que las cantidades altas de carga que acumula generan grandes daños en la infraestructura, equipos y sistemas de alimentación. Las torres de comunicación, en general construidas de metal, son de hecho muy vulnerables a la incidencia de rayos, y debido a los sistemas de comunicación que albergan es importante

lograr capturar de forma eficaz la descarga atmosférica con el uso de pararrayos que se instalan en el tope de las estructuras.

- Derivar el rayo hacia tierra en forma segura. Esto se logra asegurando el camino más corto posible de descarga a tierra. Para ello se usan conductores desnudos aislados debidamente de las estructuras metálicas de la torre, dichos conductores deben ser calculados pero su sección transversal no debe ser inferior a 13,29 mm² (6 AWG).
- Disipar la energía en tierra. Se debe tener un diseño adecuado de puesta el cual presente una resistencia determinada, de tal modo que el suelo disipe la totalidad de energía captada por el pararrayos.
- Proteger los equipos contra los efectos transitorios (sobrevoltajes y sobrecorrientes). cuando una descarga electromagnética tiene lugar muchas veces se inducen en los materiales conductores cercanos corrientes que pueden ser captadas por los sistemas de recepción (antenas) y ser transmitidas hasta los equipos por las líneas de transmisión. Para evitar esto se ubican adecuadamente protectores de línea, que derivan dichas interferencias eficientemente a tierra (Romero, 2006).

3.4.2 PROTECTORES DE LÍNEA

Los protectores de línea evitan que sobretensiones y corrientes transitorias, generadas por inducción o pro conducción directa de descargas eléctricas atmosféricas lleguen a los equipos de telecomunicaciones o entren al sistema de alimentación, derivando dichas corrientes a tierra. Los protectores de línea son usualmente conectados a los conductores, como cables coaxiales o telefónicos, aunque también se consiguen para conductores de alimentación eléctrica.

3.4.2.1 *Sistemas de puesta a tierra*

Es sistema de puesta a tierra está constituido por un electrodo o conjunto de estos (malla), por el suelo y por los conductores que unen los electrodos entre sí y con las diversos componentes eléctricos. Los electrodos cuales tienen, características eléctricas y mecánicas para responder satisfactoriamente al uso durante un tiempo prolongado.

Los pozos de puesta a tierra pueden ser contruidos de forma vertical y horizontal, con un simple electrodo, por lo general, de cobre o por un sistema más complejo. Todo esto responde a la necesidad de conseguir una determinada resistencia a tierra, entre más baja sea esta mejor es la calidad de la puesta a tierra. El parámetro de diseño indispensable es el valor de resistencia máximo que se desea obtener. El objetivo del diseño es obtener una resistencia a tierra lo más baja, al menor costo posibles.

Los diseños de puesta a tierra horizontales se realizan cuando las capas superficiales del suelo tienen mejores características de resistividad, en el caso de las capas más profundas se usan puesta a tierra de tipo vertical. Los pozos a tierra horizontales resultan más sencillos y económicos de realizar.

Las funciones de un sistema de puesta a tierra según el RETIE son:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar con suficiente capacidad las corrientes de falla, electrostática y de rayo.
- Transmitir señales de RF en onda media y larga.
- Realizar una conexión de baja resistencia con la tierra y con puntos de referencia de los equipos.

Hay que prestar principal atención al criterio fundamental para garantizar la seguridad de los seres humanos el cuál es la máxima energía eléctrica que puede soportar, debido a las tensiones de paso, de contacto o transferidas.

El potencial de contacto máximo es calculado, mediante la ecuación para personas de 50 Kg:

$$E_{touch} = \frac{116}{\sqrt{t}} [Vca]$$

Donde t corresponde al tiempo de contacto. La siguiente tabla muestra las tensiones de contacto permitidas para diferentes intervalos de tiempo según las normas IEC 60479 e IEEE 80. La columna tres plica para instalaciones de alta, media y baja tensión, y sobre personal operativo calificado con equipo de protección correspondiente (de Minas y Energía, 2013). Máxima tensión de contacto admisible para un ser humano

Tabla 2 Tiempo y tensión de contacto (de Minas y Energía, 2013)

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEC para 95% de la población (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEEE para personas de 50 kg (Ocupacional)
--------------------------------------	--	--

Mayor a dos segundos	50 voltios	82 voltios
Un segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
50 milisegundos	345 voltios	518 voltios

3.4.2.2 Medición de la resistividad aparente del terreno

Las mediadas de conductividad del terreno son transcendentales en el proceso de diseño de los sistemas de puesta tierra. Estos valores de resistividad se obtienen mediante la toma de varias mediciones, mediante algún método de medición de resistividad en diversas posiciones dentro del área de terreno establecida para la puesta a tierra, general mente en los límites de dicha área. Dos métodos de los usados para hacer dicha medición son (Serrano):

- Método de Wenner. Para este método se insertan cuatro electrodos en línea recta a una misma profundidad de penetración, las mediciones dependen de la separación entre electrodos y de la resistividad del terreno. Al tener enterrados los cuatro electrodos se hace pasar una corriente continua o de baja frecuencia a través la tierra entra los electrodos externos, mientras que se toma la medición de la diferencia de potencial obtenida entre los electrodos internos. El valor de resistencia aparente estará dado por la relación V/I . la resistividad aparente ρ estará dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi ar}{\left[1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b}}\right) - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b}}\right]}$$

Donde a es la distancia entre electrodos en metros, b es la profundidad de enterrado de los electrodos en metros y r es la lectura de la resistencia en el telurómetro en Ω .

Si la distancia enterrada b es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos a ($a \gg b$) la fórmula se simplifica (Serrano):

$$\rho = 2\pi ar$$

- Método de Schlumberger. Este es una modificación al método Wenner, se emplean, también, cuatro electrodos, la distancia entre electrodos centrales a permanece constante y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a los electrodos interiores en múltiplos enteros de a , de modo que esta distancia será na .

La resistividad se calcula por:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot r \cdot (n + 1) \cdot na$$

3.2 SISTEMAS DE PARARRAYOS

Los rayos son fenómenos naturales de tipo electromagnético que suponen una amenaza para la vida, para equipos, edificios y redes de transmisión que puedan estar en la posición y momento del rayo. Colombia está situada en la zona de confluencia intertropical, presenta una de las mayores actividades e rayos del planeta, de allí la importancia de protección contra dicho fenómeno (de Minas y Energía, 2013).

Un sistema de protección contra rayos debe tener tres componentes, que son:

- Terminal de captación o pararrayo. Es un elemento metálico conductor que se ubica en estructuras que estén expuestas al impacto directo del rayo, como torres de comunicación, chimeneas, techos, antenas y cualquier elemento que sobresalga debe ser tratado como un terminal de captación, siempre que permita la continuidad y conducción eléctrica.

Existen diferentes tipos de pararrayos, algunos son:

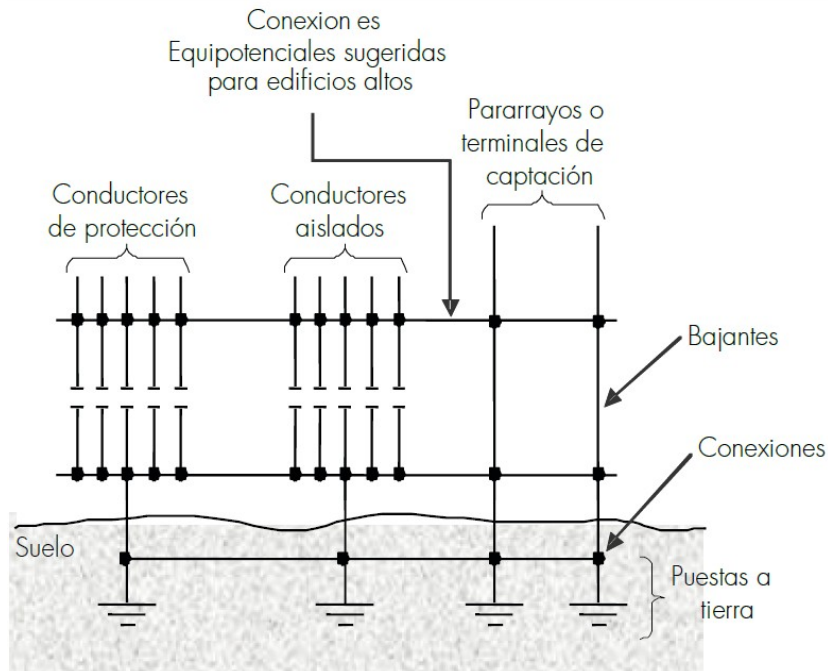
- Pararrayos ionizantes pasivos (puntas Franklin).
- Pararrayos ionizantes semiactivos (pararrayos de cebado).
- Pararrayos activos (Pararrayos con sistemas de transferencia de carga).
- Pararrayos desionizantes activos. (Romero, 2006)

Para el caso de torres de telecomunicaciones de acero se debe aislar completamente la base del pararrayos a la estructura. Además, es recomendable el uso de soldadura exotérmica para asegurar un buen contacto a los conductores de puesta a tierra.

Par estas estructuras se usa con regularidad los pararrayos tipo Franklin, que reducen los costos que en redes rurales resultan muy determinantes, y el área que se debe cubrir no es muy grande, debido a lo delgado de las torres ventadas.

Para instalaciones menos complejas, como los monopolos y mástiles tubulares el uso de un pararrayos de punto tipo Franklin debe suplir la necesidad y asegurar el funcionamiento de los equipos y el bienestar de las personas cercanas.

Figura 2 Sistema de puesta a tierra interconectado (de Minas y Energía, 2013)



- Conductores bajantes. El cable conductor se encarga de transferir la energía electromagnética incidente en el pararrayos a la puesta a tierra. Este debe procurar el camino más rápido y con menor resistencia, se debe disponer de al menos dos caminos diferentes a tierra, cumpliendo que el tiempo de descarga se el menor posible y minimizando la probabilidad de daños a las estructuras y el riesgo para el personal.

El RETIE especifica dos tipo de conductores bajantes en el diseño: los conectado a la estructura a proteger o los aislados eléctricamente da la misma. Par una torre de comunicación es necesario que los conductores estén aislados de la estructura (por lo general metálica) disminuyendo las corriente y voltajes inducido en lo equipos de comunicaciones, esto se logra con separados laterales y aisladores de carrete equidistantes en toda la altura de la torre.

- Sistemas de puesta a tierra. Para el diseño de este se toman las consideraciones explicados en la sección 2.2.2. la puesta a tierra para un sistema de pararrayos debe ser diferente de la puesta a tierra de los sistemas de comunicaciones según la norma ITU K.56 (Rec, 2003).

Además, todas las puestas a tierra de la misma estructura, si bien son independientes, deben estar interconectadas.

3.3 DISEÑO DE SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y PROTECCIÓN

Para el diseño de los sistemas se realiza en principio el dimensionamiento de carga mediante la clasificación de diferentes modelos de consumo, luego se estiman diferentes disposiciones para lograr identificar tres sistemas de conexión y alimentación eléctrica para los equipos de comunicación.

3.3.1 DIMENSIONADO Y CÁLCULO DE CARGA

Para el diseño del suministro de energía eléctrica en la que se involucra cada estación o nodo de la red donde se vería ubicada una o varias antenas con su respectiva torre, es necesario estimar la cantidad de energía que se consume. El consumo depende de la cantidad de equipos de telecomunicaciones, de su potencia, así como del tiempo de uso y además de la eficiencia de los equipos de transformación y regulación. Sin embargo se para tener un cálculo aproximado se plantean dos modelos (Romero, 2006):

Ahora, pueden existir tres tipos de consumos distintos en la red, dado que según el tipo de nodo los equipos de telecomunicación y las necesidades de consumo energético resultan diferentes. Estos tipos de nodos son: las estaciones cliente, las estaciones de repetición y las estaciones cliente y repetición.

El usuario final que hace uso de los diversos servicios (computadoras, telefonía, Internet, etc.) a través de los equipos se encuentra en estaciones cliente. Las estaciones de repetición no necesariamente han de existir usuarios, estas se instalan por las facilidades que brindan a la red, como la interconexión de dos o más nodos cliente entre sí mismo inalcanzables ya sea por condiciones ambientales o por requerimientos electromagnéticos de transmisión (potencia, canal, etc.). Por lo tanto, es comprensible que los enlaces de repetición comprenden solamente equipos de enlaces troncales de telecomunicación, mientras que los enlaces de cliente requieren de los dos modelos.

Es difícil plantear una estimación precisa que dé certeza absoluta de cuál va a ser el consumo total de los equipos en cada nodo, pero es importante tener un cálculo adecuado ya que esto depende la operatividad, la eficacia y funcionalidad de los equipos.

Para el modelo de equipamiento del cliente se presentan los siguientes valores de consumo:

Tabla 3 Consumo modelo del cliente

Cantidad	Equipo	Potencia	Tiempo de uso
----------	--------	----------	---------------

			en horas
1	Computadora	100 W	3.5
1	Enrutador WiFi	5 W	24
1	Equipo de transmisión - recepción	12 W	24
2	Luminarias	13 W	4

Los valores anteriores permiten determinar el consumo máximo de energía eléctrica que se requeriría de forma diaria (E_d) de la siguiente manera:

$$E_d = (100 \times 3.5) + (5 \times 24) + (12 \times 24) + (2 \times 13 \times 4)$$

$$E_d = 862 \text{ W} \cdot \text{hora} / \text{día}$$

Para el modelo de equipamiento las estaciones repetidoras se presentan los siguientes valores de consumo:

Tabla 4 Consumo modelo de repetidora

Cantidad	Equipo	Potencia	Tiempo de uso en horas
1	Enrutador WiFi	5W	24
2 o mas	Equipo de transmisión – recepción	12W	24

Para este caso el consumo máximo de energía eléctrica que se requeriría de forma diaria (E_d) sería el siguiente:

$$E_d = (5 \times 24) + ((2 \text{ a } 5) \times 12 \times 24)$$

$$E_d = 694 \text{ a } 1560 \text{ W} \cdot \text{hora} / \text{día}$$

En cuanto a las estaciones de repetición y clientes el consumo de los equipos es el siguiente:

Tabla 5 Consumo modelo cliente y repetidor

Cantidad	Equipo	Potencia	Tiempo de uso en horas
1	Computadora	100 W	3.5

1	Enrutador WiFi	5 W	24
2 o mas	Equipo de transmisión - recepción	12 W	24
2	Luminarias	13W	4

El consumo máximo de energía eléctrica que se requeriría de forma diaria (E_d) es con relación a lo anterior:

$$E_d = (100 \times 3.5) + (5 \times 24) + ((2 \text{ a } 5) \times 12 \times 24) + (2 \times 13 \times 4)$$

$$E_d = 1270 \text{ a } 2134 \text{ W} \cdot \text{hora/día}$$

Otro cálculo importante para efectos de diseño es de la potencia y la corriente demandadas, esto permite determinar los componentes y características del sistema de protección y suministro eléctrico. En la siguiente tabla se evidencian dichos cálculos con relación a cada modelo planteado.

Tabla 6 Consideraciones de corriente y Potencia

Modelo	Potencia total en vatios	Corriente demandada en amperios para 110 VAC
Estación cliente	146	1.33
Modelo estación de repetición	17-65	0.155-0.6
Estación de repetición y cliente	146-194	1.33-1.76

Todos los datos se calcularon para cargas conectadas en corriente alterna.

3.4 DISEÑO DE CONEXIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN

Debido a lo anterior se describen dos situaciones que originan diversos modelos de diseño:

- Modelo de acometida. Este comprende la conexión directa a la red de distribución, para ello se hace uso de un transformador que permita conseguir la tensión adecuada según la norma nacional vigente (NTC-2050) para redes residenciales de baja tensión, estos valores son de 110Vrms para tensiones de fase y 208Vrms o 240Vrms para tensiones de línea. Se debe utilizar un conductor adecuado según requerimientos con una sección transversal no

menor a 8.33mm^2 (8 AWG), se debe disponer de una caja con un contador certificado y un sistema de interrupción primario, comúnmente se utiliza un disyuntor termo magnético que no debe superar una corriente de corte de 100 A. Los conductores de la acometida deben ser aislados, en dos conductores (acometida monofásica), o por medio de un conductor central y de un neutro concéntrico (cable anti-fraude) los cuales deben ir dentro de tuberías metálicas de un diámetro no menor a $\frac{1}{2}$ pulgada, el tramo del conductor debe ser lo más recto posible.

Para puesta a tierra un conductor debidamente aislado que no sea inferior a 5.25mm^2 (10 AWG) debe ser utilizado para conexión con el electrodo de puesta a tierra, el cual debe estar cubierto por tuberías metálicas con un diámetro no inferior a $\frac{1}{2}$ pulgada.

A partir de allí se procede a instalar los respectivos circuitos y sus correspondientes elementos de protección, al través de una caja hemática de repartición. Los conductores que alimentan la caja de repartición deben tener una sección transversal mínima 3.3mm^2 (12AWG), según lo especifica la norma NTC2050 en el capítulo 8, cada circuito debe tener un interruptor termo magnético con una corriente de corte nominal mínima de 15A.

Los circuitos que de lo anterior se derivan se realizan con conductores aislados 2.05mm^2 (14 AWG) para la alimentación eléctrica de equipos con valores de tensión mayores a 60V (Norma, 2013).

- Modelo de circuito ramal o anexo a una acometida existente. Para este modelo se tiene en cuenta la conexión interna a la red domiciliaria, por medio de una caja de distribución que cuente con un interruptor termo magnético o diferencial el cual tiene un corriente de corte de 15 A (según la norma eléctrica vigente este no puede ser de menor valor). A partir de allí los conductores deben tener una sección transversal de 3.3mm^2 (12AWG) o 2.05mm^2 (14 AWG), los cuales permiten la circulación de corrientes de 20 y 10A respectivamente, deben ir protegidos por tubería o canalizaciones, que eviten el contacto con las personas y protejan los conductores del deterioro producido por causas ambientales (Norma, 2013).

3.5 CALCULO DEL NÚMERO DE PANELES Y DE BATERÍAS PARA LA RED RURAL EN LA REGIÓN

En la región del Sumapaz los valores calculados del número de paneles se pueden determinar encontrando los valores de radiación solar que se tomaron para el peor mes en cada municipio (10 en total). Esto permite obtener un valor de referencia, si existe la necesidad de utilización de sistemas fotovoltaicos

autónomos, en algún punto de cada municipio como medio de alimentación eléctrica para los equipos en cualquier nodo en la red.

El panel con el cual se realiza el siguiente cálculo es un panel mono cristalino, con una corriente de trabajo de 5.79A, una tensión nominal de 12V y una potencia nominal de 70W (Anexo 1).

Tabla 7. Dimensionado sistema solar

Municipio	Modelo de consumo de energía	de de	Valores de energía diaria Wh/ día	Radiación mensual en W	Cálculo Energía total Wh/ día	Numero de paneles
Granada	Modelo de estación cliente		862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición		1560	4600	2230,8	5
	Modelo de repetición y estación cliente		2134	4600	3051,62	7
Silvania	Modelo de estación cliente		862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición		1560	4600	2230,8	5
	Modelo de repetición y estación cliente		2134	4600	3051,62	7
Tibacuy	Modelo de estación cliente		862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición		1560	4600	2230,8	5
	Modelo de repetición y estación cliente		2134	4600	3051,62	7
Pasca	Modelo de estación cliente		862	4060	1232,66	4
	Modelo de repetición		1560	4060	2230,8	6
	Modelo de repetición y estación cliente		2134	4060	3051,62	8
Fusagasugá	Modelo de estación cliente		862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición		1560	4600	2230,8	5

Pandi	Modelo de repetición y estación cliente	2134	4600	3051,62	7
	Modelo de estación cliente	862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición	1560	4600	2230,8	5
Arbeláez	Modelo de repetición y estación cliente	2134	4600	3051,62	7
	Modelo de estación cliente	862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición	1560	4600	2230,8	5
San Bernardo	Modelo de repetición y estación cliente	2134	4600	3051,62	7
	Modelo de estación cliente	862	4600	1232,66	4
	Modelo de repetición	1560	4600	2230,8	6
Venecia	Modelo de repetición y estación cliente	2134	4600	3051,62	8
	Modelo de estación cliente	862	4600	1232,66	3
	Modelo de repetición	1560	4600	2230,8	5
Cabrera	Modelo de repetición y estación cliente	2134	4600	3051,62	7
	Modelo de estación cliente	862	4640	1232,66	3
	Modelo de repetición	1560	4640	2230,8	5
	Modelo de repetición	2134	4640	3051,62	7

Calculo del número de baterías, para este diseño se escoge una batería de ácido de plomo que resultan más económicas, la profundidad de descarga se tomó en el 20%, la capacidad de este tipo de baterías llega a los 100Ah, sin embargo, este último valor se estimó en 60Ah.

Anexo 2 Cálculo del número de baterías

Tabla 8. Dimensionado número de baterías

Modelo de consumo de energía	Valores de energía diaria Wh/día	Capacidad en Wh	Numero de Baterías
Modelo de estación cliente	862	4669,166667	4
Modelo de repetición	1560	8450	6
Modelo de repetición y estación cliente	2134	11559,16667	9

Para el cálculo de corriente en el inversor se considera la tensión de diseño 24V y se tienen cuenta un valor deficiencia del 90% (Anexo 4). Se toman los valores de potencia de la instalación puesto que no se contempla el uso de equipos en corriente continua.

Tabla 9. Dimensionado inversor

Modelo de consumo de energía	Valores Potencia en W		Corriente en A	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
Modelo de estación cliente	146		6,84375	0
Modelo de repetición	17	65	0,796875	3,046875
Modelo de repetición y estación cliente	146	194	6,84375	9,09375

4. PROBLEMA DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TOPOLOGÍA

En una comunicación inalámbrica a distancias relativamente grandes que use las bandas libres de 2.4 o 5 GHz se necesita que exista línea de vista entre el transmisor y el receptor para ello se debe instalar las antenas en torres que permitan sobrepasar obstáculos como árboles, construcciones y la topografía. Construir tales torres resulta muy costoso. La altura necesaria depende de la distancia del enlace y las obstrucciones, y el costo de la torre se incrementa en proporción con la altura. En la Tabla 1 se muestra una lista de los costos de construir torres para varias alturas y materiales.

El costo de construir las torres supera por mucho el valor de los equipos IEE 802.11 (WiFi) de bajo costo. El principal requerimiento de la construcción de redes rurales es el mantener su costo lo más bajo posible.

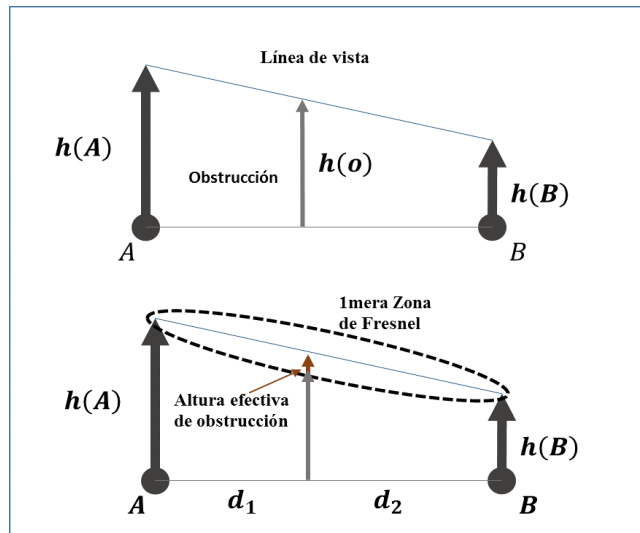
Dado que el precio de las torres de soporte de las antenas domina otros costos de infraestructura el problema principal se convierte en mantenerlos mínimos en la construcción de las torres de soporte para las antenas en cada nodo.

4.1 REQUERIMIENTOS DEL PROBLEMA

Ahora, se presentarán los principales aspectos en la solución de este problema:

- Requerimientos de conectividad: es importante asegurar que la topología planteada permita la conexión de la totalidad de la red. (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008)
- Limitaciones físicas: hay múltiples limitaciones físicas para la altura de las torres. Por ejemplo, existe una altura suficientemente alta que representa un umbral para el cual los costos son prohibitivos. Esto representa la altura máxima para una torre. Además, las antenas ubicadas en una torre tienen que mantener un ángulo de separación mínimo, porque su directividad es efectiva solo a una distancia significativa de las antenas (Dutta, y otros, 2007).
- Naturaleza de la función de costos: se manejan dos tipos distintos de torres. Para alturas menores a 20m se suelen usar los mástiles económicos. Para alturas mayores, es necesario utilizar torres de acero más elaboradas, y por ende más caras, el costo de estas estructuras varía de manera casi lineal con la altura. También hay que tener en cuenta que entre los mástiles y las torres de acero existe una diferencia de magnitud grande. Dicho lo anterior, el comportamiento del precio de los mástiles, por su poca variación con la altura, resulta casi constante con relación a las torres de acero. Se obtiene así, una función de costos por partes donde se establece la altura de 20 m como máxima para la utilización de mástiles y mínima para el uso de torres de acero (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008).
- Condiciones sobre las alturas de las torres para establecer un enlace directo: hay que garantizar que la potencia transmitida sea la suficiente para superar las pérdidas por espacio libre en toda la distancia del enlace, que se pueden determinar a partir de la potencia de transmisión mediante la Ecuación 1 (Permite determinar la potencia transmitida donde G_t y G_r hace referencia a la ganancia de las antenas receptora y transmisora respectivamente, d es la distancia de separación de las antenas, P_t , P_r son las potencias de transmisión y recepción, mientras que λ es la longitud de onda en metros. L es el coeficiente de pérdidas) : (Rappaport & others, 1996)

Figura 3 Cálculo de la altura de las torres en el fin de los puntos de enlace



$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad ()$$

Luego se busca mantener la línea de vista despejada de toda obstrucción. De manera que, al establecer el enlace, definido por una línea recta que une las dos antenas, éste no se vea afectada por ningún obstáculo. Además, se debe despejar de toda obstrucción un área elíptica conocida como la primera zona de Fresnel. Con esto se garantiza que las pérdidas por difracción sean minimizadas, en ello es importante explicar los siguientes conceptos:

- Difracción. Al propagarse un frente de onda por un canal obstruido se genera una perturbación ya que la onda rodea dicha obstrucción. Este fenómeno puede ser descrito como fuentes puntuales de la señal en cada punto de obstrucción que atraviesa el frente de onda (Principio de Huygens) (Rappaport & others, 1996).
- Zonas de Fresnel. Representan regiones sucesivas que incrementan la diferencia entre el camino más corto entre las dos antenas (línea de vista) y el camino de ondas secundarias producidas por la difracción, en $\lambda/2$. Cada zona de Fresnel limita el área donde un obstáculo marginal genera ondas difractivas que resultan en interferencias destructiva o negativa en el receptor, de forma alternada. (Rappaport & others, 1996)

El radio de la zona de Fresnel n , es denotado por r_n es expresado en función de n , las distancias d_1 y d_2 y la longitud de onda λ como:

$$r_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \quad ()$$

Donde, λ es la longitud de onda de la señal de transmisión.

Para establecer la línea de vista en RF se hace necesario liberar de obstrucciones cerca del 60% de r_n en el punto O (punto donde existe la mayor obstrucción). En la Figura 1 se muestra que la línea que une las antenas A y B debe estar a una altura mayor de $h_0 + 0,6r_f$ sobre el punto O. (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008)

4.2 COMPLEJIDAD DEL CÁLCULO

Para tratar el problema de manera formal, se describe la topología de la red por medio de un grafo. El cual está compuesto por un arreglo de vértices o nodos V y un arreglo de enlaces E , de manera que $G = (V, E)$. La cantidad de nodos n será pues $n = |V|$. Una función de alturas h asignará una altura de torre a cada nodo en G (considerando solo alturas con valores enteros). Luego se establece un subgrafo $COVER(h)$ que comprende los nodos cubiertos por la función de alturas h . Para que un enlace (u, v) sea relacionado por la función de alturas h , las alturas de las torres $(h(u), h(v))$ en cada nodo deben ser suficientes para establecer un enlace.

Una función de costos c determinará el valor de la altura de la torres en determinado nodo. Así, el costo total de la función de alturas estará dada por $\sum_{u \in V} c(h(v))$. El problema se fundamenta en encontrar una función de altura que represente el menor costo total posible, para cada subgrafo conectado y expandido $COVER(h)$.

El establecer las aristas adecuadas para conseguir el subgrafo $COVER(h)$ resulta computacionalmente costoso, por causa de que se debe buscar sobre todos los posibles grafos expandidos y conectados, y sobre cada posible altura de la torres en cada nodo. Los autores de (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) determinan que el algoritmo óptimo es un NP-hard (Dasgupta, Papadimitriou, & Vazirani, 2006), con una reducción del conjunto de vértices conectados no mejor que un factor logarítmico $O(\log n)$, sin embargo, demuestran que por medio de una aproximación se consigue un comportamiento de reducción constante a través de

un algoritmo voraz llamado TC-ALGO (greedy algorithms (Dasgupta, Papadimitriou, & Vazirani, 2006)).

5. ECUACIÓN DE COSTOS

La función de costos c relaciona la variación de costos con la altura tanto de mástiles tubulares y torres de acero ventadas.

Los mástiles son estructuras simples que resultan económicas, pueden ser elaboradas con diferentes materiales y muchas veces montadas sobre estructuras o edificaciones existentes. Las torres ventadas son torres de acero mucho más elaboradas que los mástiles, son estructuras que pueden sostener una carga de fuerzas mayores, pero aun así, son con relación a otros tipos de torre, más económicas.

Se puede considerar, entonces que la ecuación de costos es una función por partes la cual para alturas menores a h_{min} considera los valores correspondientes a los mástiles económicos, para alturas mayores se evalúan los costos de las torres ventadas. Por tal motivo la siguiente función resulta apropiada:

$$c(h) = \begin{cases} K & \text{si } 0 \leq h \leq h_{min} \\ Ah + B & \text{si } h_{min} \leq h \leq h_{max} \end{cases} \quad ()$$

Donde K , A y B , representan constantes y $Ah_{min} + B \gg K$ (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008).

Ahora se plantea lograr que en todos los enlaces cada par de nodos (u, v) tengan las alturas específicas que permitan mantener un enlace de comunicación directa entre los mismos. Lo que quiere decir, que para una función de alturas h , un enlace se determina cubierto si cumple que las alturas de las torres en los nodos está dada por $h + a$, donde a es el incremento de altura que permite el enlace. Para esto último, se determina la función de obstrucciones entre los puntos (u, v) O_{uv} , la cual representa la topografía (teniendo en cuenta la liberación de la zona de Fresnel) a lo largo de la distancia entre los u y v . (Dutta, y otros, 2007)

Para un conjunto $E' (E' \subset E)$ de enlaces que están cubiertos por la función $h + a$, entonces la función de costos a minimizar dependerá de la relación:

$$\sum_{i=1}^n c(h(i)) \quad ()$$

La Ecuación 4 representa el costo de construir todas las torres necesarias para la red.

5.1. ECUACIÓN DE COSTOS: APLICADA A LA REGIÓN

En la región, según cotizaciones hechas a diversas empresas fabricantes de torres en la ciudad Bogotá, se pudo establecer que el valor medio de la construcción de mástiles tubulares es aproximadamente de \$250000, por lo tanto este valor determina K para la función de costos $c(h)$.

En tanto que el valor de variación de costos por metro de las torres ventadas se encuentra en promedio en \$550000, estableciendo así la pendiente de la función costos para alturas mayores a h_{min} (20m), el valor de B resulta más complejo, ya que depende de los costos relativos a estudios de terreno, cimentación y diseño estructural. A Pesar de esto se puede determinar la función de costos de la siguiente manera:

$$c(h) = \begin{cases} 250\,000 & \text{si } 0 \leq h \leq 20m \\ 550\,000 h + B & \text{si } h > 20m \end{cases} \quad (5)$$

6. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

La descripción del algoritmo corresponde al planteamiento descrito en (Dutta, y otros, 2007), donde se involucra el problema de construcción de la topología (TC). Un grafo no dirigido $G(V, E)$ determina la estructura de red, donde V es el conjunto de nodos, E el conjunto de aristas o enlaces y $n = |V|$. Un subgrafo denominado $COVER(h)$ corresponde al conjunto de aristas que son establecidas por la función de altura h . Cada valor en h corresponde a un valor en la función de costos c , la cual está determinada por $\sum c(h(u))$. El éxito del algoritmo reside en encontrar una función de alturas h en la cual el costo total sea mínimo.

ALGORITMO 1.

TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008)

TC-ALGO(G, c)

```

1  Entrada : Grafo G(V, E), función de costos c
2  Salida: función de alturas h
3  Para cada v en V hacer: h(v) := 0;
4  Mientras COMP(h) > 1;
5      rbest = ∞;
6      Para cada v en V hacer :
7          H(v) := { h(v), hmax } ∪ { c-1(h(v)) +
              2i : c(h(v)) + 2i < c(hmax) e i =
              0, 1, 2, 3, 4 ... };
8          Para α ∈ H(v) hacer:
9              (rtmp, incrtmp) = STAR – TC –
              ALGO (G, h, v, α – h(v));
10         Si rtmp < rbest entonces:
11             rbest := rtmp; incrbest := incrtmp;
12         Para cada v ∈ V hacer h(v) := h(v) + incrbest(v);
13  Devuelve h;
```

El algoritmo es denominado TC- ALGO como se muestra en Algoritmo1. Utiliza la subrutina START TC-ALGO (Algoritmo 2). Al comienzo de TC-ALGO la función de alturas h es inicializada en 0, $COVER(h)$ en un conjunto vacío y $COMP(h) = n$. Donde $COMP(h)$ es la cantidad de componentes en $COVER(h)$. El algoritmo finalizará cuando $COMP(h) = 1$, o el subgrafo $COVER(h)$ esté en su totalidad conectado.

El algoritmo se presenta con dos rutinas, la primera llamada TC-ALGO permite recorrer el grafo en cada nodo y determinar los incrementos de altura que se harán en un nodo central y que permitirá establecer un enlace directo con uno o varios de los nodos vecinos, la cantidad de enlaces realizados con un incremento de altura representa el beneficio del costo de dicho incremento. Cada incremento de altura se realiza por fases. Para determinar los incrementos de altura se establecen dos condiciones:

- “Los incrementos son locales. Algún incremento de altura $incr$ hecho en una fase es tal que, existe un nodo v de manera que $incr$ solamente incrementa las alturas en v y sus vecinos. El nodo v es llamado nodo central de $incr$. Esta restricción sobre el incremento de altura ayuda a localizar la búsqueda de los mejores incrementos de altura”.
- “Solamente las aristas incidentes sobre el nodo central agregan beneficio. Sea h la función de altura en el inicio de una fase. Cualquier incremento de altura $incr$, se dice que con el nodo central v algunas nuevas aristas están cubiertas, se establece E' . Sea $E^{v'}$ un subconjunto de E^v que contiene solo las aristas que inciden en v . entonces el beneficio de $incr$ en esta fase es

la diferencia entre el número de componentes de $COVER(h)$ y $COVER(h) \cup Ev'$. Esta definición de benéfico ayuda a simplificar el análisis de la garantía de aproximación”.

Se busca en cada incremento determinar cuál presenta una menor relación de costo beneficio. Para esto TC-ALGO busca el mejor candidato a nodo central v y también se verifica el mejor incremento para dicho nodo en una función de alturas denominada \mathcal{H} la cual contiene la altura de nodo central $h(v)$, la altura máxima h_{max} , y los incrementos de altura correspondientes a los incrementos de costo determinados de forma exponencial ($2^i = \{1, 2, 4, 8, \dots\}$).

Pero, a pesar de que se busca sobre cada candidato de nodo central v y sus posibles incrementos de altura, todavía se tiene que buscar en los incrementos posibles de altura de los vecinos de v . Por lo tanto, queda con un subproblema, que se le da el nombre de STAR-TC: dado la actual función de la altura h , un nodo v central y su incremento en altura δ , encontrar un incremento de la altura en los vecinos de v que tiene la proporción más baja de costo-beneficio.

ALGORITMO 2

START-TC-ALGO. (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008)

START-TC-ALGO(G, c)

- 1 **Entrada :** Grafo $G(V, E)$, función de alturas h , nodo n , incremento de altura δ en v
- 2 **Salida:** relación costo beneficio r'_{best} , incremento de altura $incr$
- 3 $c^+(v) := c(h(v) + \delta) - c(h(v))$;
- 4 $nbr :=$ conjunto de nodos de v que no están en el mismo componente que v en $COVER(h)$
- 5 **Para** cada nodo $u \in nbr$ **hacer:**
- 6 $h^+(u) := \beta$ más pequeño de manera que los incrementos de altura $(h(v) + \delta)$ en v y $(h(u) + \beta)$ en u que permita cubrir el enlace (v, u)
- 7 $c^+(u) := c(h(u) + h^+(u)) - c(h(u))$;
- 8 $L :=$ lista de nodos en nbr en orden ascendente de c^+ ;
- 9 **Para** cada componente D en $COVER(h)$ **hacer:**
- 10 remover de L todos los nodos $u \in D$ a excepción del nodo con menor c^+
- 11 $r'_{best} := \infty, k_{best} := 0$;
- 12 **Para** $1 \leq k \leq |L|$ **hacer**
- 13 $r'_{best} := (c^+(v) + \sum_{1 \leq i \leq k} c^+(L[i]))/k$;
- 14 **Si** $r'_{tmp} < r'_{best}$ **entonces:**
- 15 $k_{best} := k; r'_{best} := 0$;
- 16 **Para** cada $u \in V$ **hacer:** $incr(u) := 0$;
- 17 **Para** cada $u \in L[1 \dots k_{best}]$ **hacer:** $incr(u) := h^+(u)$;
- 18 $incr(v) := \delta$;
- 19 **Devuelve** $(r'_{best}, incr)$;

El Algoritmo 2 muestra la rutina STAR- TC- ALGO para el problema STAR- TC. Se observa en primer lugar que el aumento de la altura en los nodos que están en el mismo componente que v no reduce el número de componentes. Por lo tanto, se restringen los incrementos de altura sólo a aquellos vecinos de v que se encuentran en un componente diferente de v en $COVER(h)$. Se llama a este conjunto de nodos nbr . Ahora, para cada nodo u en nbr se busca el mínimo incremento de altura $h^+(u)$, en u tal que el enlace (v, u) esté cubierto (Esto se puede hacer mediante una búsqueda binaria sobre los incrementos posibles de altura en u). Se debe tener en cuenta que como la función de costo es monótona, el incremento en altura $h^+(u)$ también da el incremento de costo más bajo $c^+(u)$ en u para cubrir la arista (u, v) . Ahora, se enumeran todos los nodos en nbr en orden creciente de sus valores c^+ . Se llama a esta lista L . A continuación se observa que, una vez que un enlace de v a un nodo en algún otro componente está cubierto, se reduce el número de componentes en $COVER(h)$. Entonces se debe

elegir el mejor candidato en L . Por lo tanto, para los nodos en el mismo componente, se mantiene el nodo con costo incremental más bajo (c^+) en L , y se eliminan los demás nodos de L .

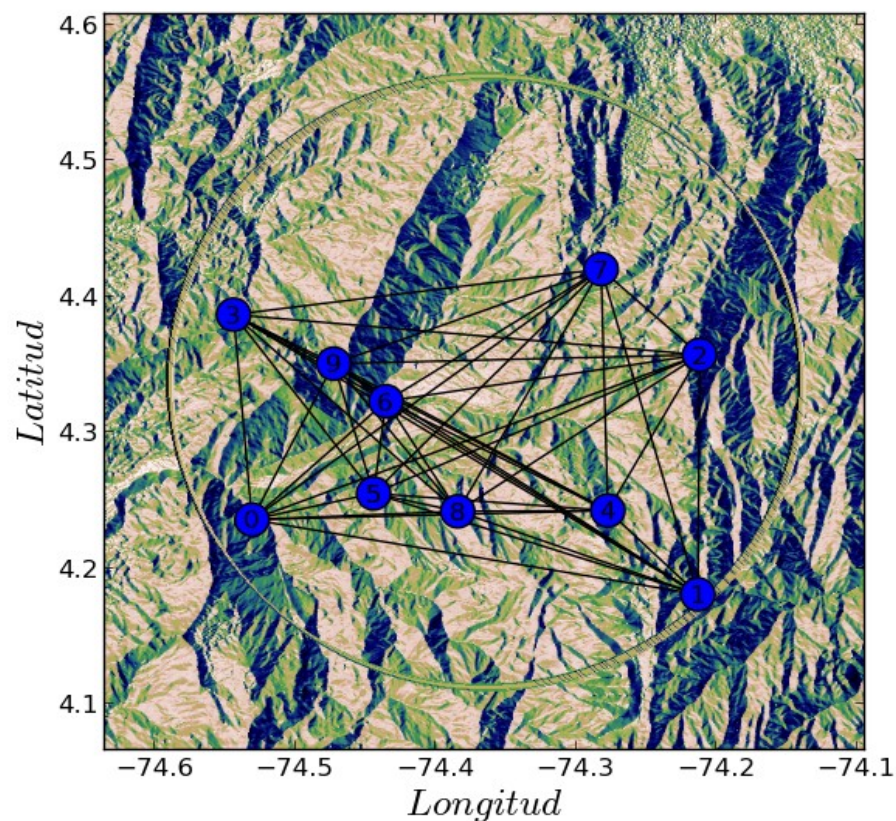
Cada incremento aumenta la altura sólo en v y los nodos de menor costo en el conjunto L . Más precisamente, el incremento en altura i -ésima aumenta la altura del v por δ , las alturas de los primeros k nodos en L por sus respectivos $h^+(u)$ y todos los demás nodos por 0. Se debe tener en cuenta que el beneficio de un incremento tal es exactamente k . Luego, entre todos estos incrementos de altura, retorna el que tiene la proporción más baja de costo-beneficio. (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008)

7. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

Para la realización de TC-ALGO y para la función STAR TC-ALGO se usó del software de desarrollo Python el cual cuenta con características específicas, como son la facilidad y lo reducida de su sintaxis, el uso eficiente de bibliotecas, además es una plataforma muy versátil. (Marzal & Gracia, 2003).

En relación al TC-ALGO, se hace uso de las bibliotecas NetworkX la cual permite la creación, manipulación de grafos, y de manera indirecta Matplotlib la cual permite la creación de gráficas.

Figura 4 Grafica que arroja la ejecución de la aplicación



8. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA EN LA RED RURAL PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN LA REGIÓN DEL SUMAPAZ

Topología de red para la región del Sumapaz

8.1 CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA INICIAL

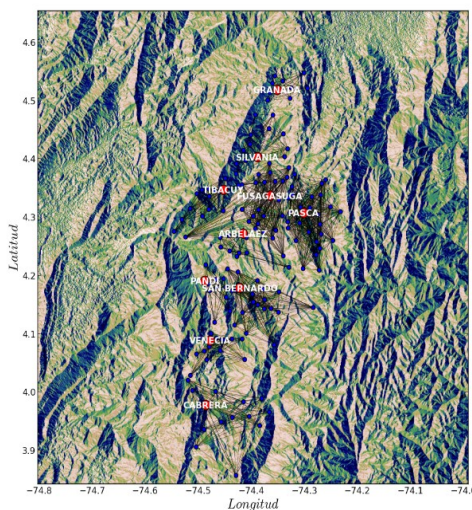
Para la creación de la topología inicial se cuenta con una VPN que uniría por medio de fibra óptica (ya establecida en la actualidad por operados de servicios de telecomunicaciones de naturaleza privada) a las 10 cabeceras municipales en la región, y de allí se ubicarían 10 redes inalámbricas que permitirán el acceso a las escuelas rurales.

Así cada escuela hará parte de una subred establecida por un punto de acceso en cada cabecera municipal y cuantas escuelas rurales se puedan conectar por municipio.

Para tener un conocimiento preliminar de dicha topología que está determinada por la ubicación geográfica de cada escuela y por las características del terreno. Se hace uso de información que se encuentra disponibles en mapas geográficos realizados mediante el uso de satélites, estos mapas son parte del proyecto SRTM de la NASA.

Al adquirir el mapa de la región se procede a ubicar por medio de sus coordenadas geográficas cada escuela y cabecera municipal en la red. Posteriormente se evalúa el perfil del terreno presente entre cada par de nodos que conforman un enlace.

Figura 5 Mapa de la topología inicial de la red



8.2 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA

La creación de la topología de red inalámbrica en casos donde se tiene un número de nodos n elevado ($n > 5$) resulta dificultoso realizar los cálculos adecuados que permitan obtener valores de altura óptimos en las estructuras de soporte de las antenas. Estas alturas son determinantes para establecer un enlace directo entre un par de nodos (u, v) , y de ahí partir para conseguir que toda la red este completamente conectada, para ello la altura de un nodo cualquiera u no solo de satisfacer un enlace directo con un nodo v , sino que también para cualquier otro nodo w de la red, esto hace que la cantidad de enlaces aumente y logra conseguir la condición de conectividad buscada.

Debido a lo anterior es importante realizar una búsqueda no solo de altura sino de los enlaces óptimos que requiere la topología. El número de enlaces e , entonces, aumentaría la complejidad del diseño físico de la red, siendo $e = \binom{n}{2}$ para una red totalmente conectada (sí $5 \leq n \leq 20, 10 \leq e \leq 190$).

La topología inicial corresponde a una red que se representa por un grafo no dirigido $G(V, E)$ determina la estructura de red, donde V es el conjunto de nodos y E el conjunto de enlaces aristas. El grafo inicial es un grafo completo lo que quiere decir que todos los nodos u tienen un enlaces con cualquier otro nodo v en la red. Dicho de otra forma para un número de nodos n el número de enlaces no dirigidos e es igual a la combinatoria de n en 2

8.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO

Entre dos nodos físicos en una red (u, v) , existe a lo largo de la distancia que los separa una cantidad de obstrucciones dada, debido a la topografía regional y a la vegetación. El perfil del terreno corresponde a la disposición geométrica construida por todas las obstrucciones presentes en el trayecto del enlace.

Al tener las posiciones geográficas de cada nodo en la red, y al establecer los enlaces en un diseño de topología de red inicial, es posible, obtener un perfil de obstrucciones relativo a cada enlace. Por medio de manipulación de mapas satelitales de elevación del terreno, se posicionan en el mapa determinado según sus coordenadas los nodos (u, v) y luego mediante interpolación se seleccionan los valores que corresponden a las posiciones geográficas que se encuentran sobre la línea recta que relaciona los dos nodos.

Además es importante despejar la primera zona de Fresnel (Rappaport & others, 1996) lo cual se consigue sumando el radio de la zona de Fresnel al perfil del terreno. El radio de la primera zona de Fresnel corresponde a:

$$r_n = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \quad (6)$$

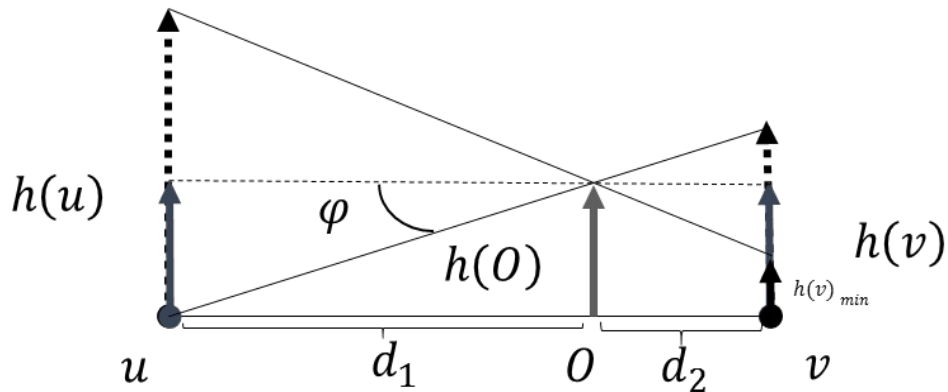
Donde λ corresponde a la longitud de onda de la señal transmitida, d_1 y d_2 son las distancias desde cada uno de los nodos u y v respectivamente.
Altura máxima de obstrucción.

El objetivo de conseguir un perfil del terreno en el trayecto de cada enlace en la red, es el poder identificar la mayor obstrucción que se presenta, y esta será determinante en el costo de establecimiento del enlace. Esta obstrucción aumenta según el radio de la zona de Fresnel calculado para la distancia en la que se encuentra con respecto al centro de la trayectoria del enlace.

Al calcular las alturas $h(u)$ y $h(v)$ de manera que la línea recta imaginaria que las une este por sobre la obstrucción es claro que fácilmente $h(u), h(v) = h(O)$ para simplicidad de diseño se supone la obstrucción máxima en la mitad de la trayectoria por lo que la sumatoria de las dos alturas en los enlaces debe ser mínimo $2h(O)$.

En un conjunto de datos que representan el perfil es fácil encontrar el valor máximo que representa la mayor obstrucción, sin embargo, la altura en cada nodo que corresponde a la altura de en la que se deben colocar las antenas dependen de la altura de la obstrucción y de la posición de esta a lo largo de la trayectoria del enlace.

Figura 6 Altura de las antenas



Al calcular las alturas $h(u)$ y $h(v)$ de manera que la línea recta imaginaria que las une este por sobre la obstrucción es claro que fácilmente $h(u), h(v) = h(O)$ en este caso la sumatoria de las dos alturas en los enlaces corresponde $2h(O)$. Sin embargo para cualquier altura en $h(u)$ pertenecerá un valor en $h(v)$, dicha altura corresponde a la ecuación:

$$h(v) = h(O) - d_2 \left(\frac{h(u) - h(O)}{d_1} \right) \quad (7)$$

De esta forma para que se cumpla un enlace (u, v) la sumatoria de $h(u)$ y $h(v)$ tendrá un valor mínimo de:

$$h(u) + h(v) = h(u) + h(O) - d_2 \left(\frac{h(u) - h(O)}{d_1} \right) \quad (8)$$

8.4 DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA

Al conocer el perfil del terreno y las obstrucciones máximas en cada enlace de la red, y luego de generar la topología de red inicial se procede a utilizar el algoritmo TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) que procura una topología de red óptima en el cual los parámetros de entrada los constituye el grafo inicial G y una ecuación de costos de terminada por:

$$c(h) = \begin{cases} 250\,000 & \text{si } 0 \leq h \leq 20m \\ 550\,000 h + B & \text{si } h > 20m \end{cases} \quad (9)$$

Dicho grafo inicial G representa la topología inicial planteada, con valores de obstrucción propias del relieve contexto del contexto de la red.

El algoritmo TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) se encarga de la búsqueda en cada nodo u del incremento de altura δ que obtenga la mayor cantidad de enlaces a un costo óptimo, esta búsqueda se realiza mediante la subrutina START-TC-ALGO esta evalúa los nodos vecinos a u sus elaces y los incrementos que permiten establecer enlaces por sobre las obstrucciones, las cuales se representan por el peso (weight) (Harju, 2011) del enlace o arista.

Cada enlace o grupo de estos conforma un nuevo componente dentro del grafo, existirán enlaces que aseguren la conexión entre dos o más componentes de forma que cuando se consiga un solo componente el grafo final llamado COVER(h) estará completamente conectado.

Al ejecutar el algoritmo para la topología de red inicial, se consigue un nuevo grafo que representa una solución bastante óptima, con una densidad (Harju, 2011) menor que el grafo inicial. La densidad de un grafo representa la relación que existe entre el número de nodos y el número de enlaces cuya representación matemática es:

$$d = \frac{2e}{n(n-1)} \quad (10)$$

Donde e es el número de aristas y n es el número de nodos del grafo, esta relación corresponde a un grafo no dirigido.

9. SIMULACIONES NUMERICAS

En esta sección, se describen las simulaciones numéricas que se realizaron con el fin de evaluar el algoritmo desarrollado comparándolo con un algoritmo elemental descrito más adelante.

Se utilizan topologías aleatorias que permiten mostrar ampliamente el desempeño del algoritmo.

9.1 GENERACIÓN DE GRAFOS DE TOPOLOGÍA ALEATORIA

Se hace la toma de datos que permita la observación estadística de las tendencias de relación entre los dos algoritmos (algoritmo aproximado TC-ALGO, heurística simple). Para ésta se consideran grafos de entrada completamente conectados y se establecen valores de obstrucción aleatorios menores a 20 metros. Esta obstrucción se asigna como el peso que se requiere para establecer una arista o enlace ($weight_{u,v}$).

La topología de cada grafo se crea a partir de la generación de una topología con alturas, ubicando cada nodo en una posición aleatoria dentro de un espacio no mayor a 25 Km de radio. Se establece en cada enlace (u,v) determinado, una única obstrucción O_{vu} en la mitad del enlace. Además se adiciona a cada obstáculo el valor de la zona de Fresnel que se calcula con la ecuación 2. Esto para simular condiciones apropiadas para la verificación y desempeño del algoritmo realizado (Figura 3).

9.2 ALGORITMO BÁSICO O HEURÍSTICA SIMPLE

Con el fin de lograr una comparación de aproximación, la heurística simple se desarrolla por medio de la resolución de un subgrafo conectado y expandido del grafo de entrada $G = (V, E)$. Este subgrafo corresponde al árbol mínimo expandido (*minimum spanning tree*)^T de G .

Tabla 10 Algoritmo de Heurística Simple

Heurística-Simple (G, c)

```

1  Entrada : Grafo  $G(V, E)$ , función de
    costos  $c$ 
2  Salida: función de alturas  $h$ 
3   $h(v) := 0$ 
    Para cada nodo  $v$  en  $V$  hacer:

    ;

4   $T(V, E') :=$  es un grafo que corresponde
    al mínimo árbol expandido de  $G$ 
5  Para cada arista  $(v, u)$  en  $E'$  hacer:
6       $h(e) :=$  altura de la obstrucción
        en medio del enlace entre  $u$  y  $v$ 
7      Si  $h(v) + h(u) < 2(h(e))$  entonces:
8           $h^+(u), h^+(v) := \frac{2(h(e)) - h(v) - h(u)}{2}$ 

9           $h(v), h(u) := \frac{h(v) + h^+(v)}{2}, \frac{h(u) + h^+(u)}{2}$ 

10 Devuelve  $h$ ;

```

Dicho grafo corresponde al conjunto de nodos V y al conjunto de aristas E' que es el subconjunto de E que representa los enlaces con menor costo, sin embargo el grado de nodo máximo es 2.

Luego de obtener $T = (V, E')$ se establecen valores de altura en cada nodo de forma que se permita cubrir todas las aristas o enlaces en T procurando minimizar el costo total.

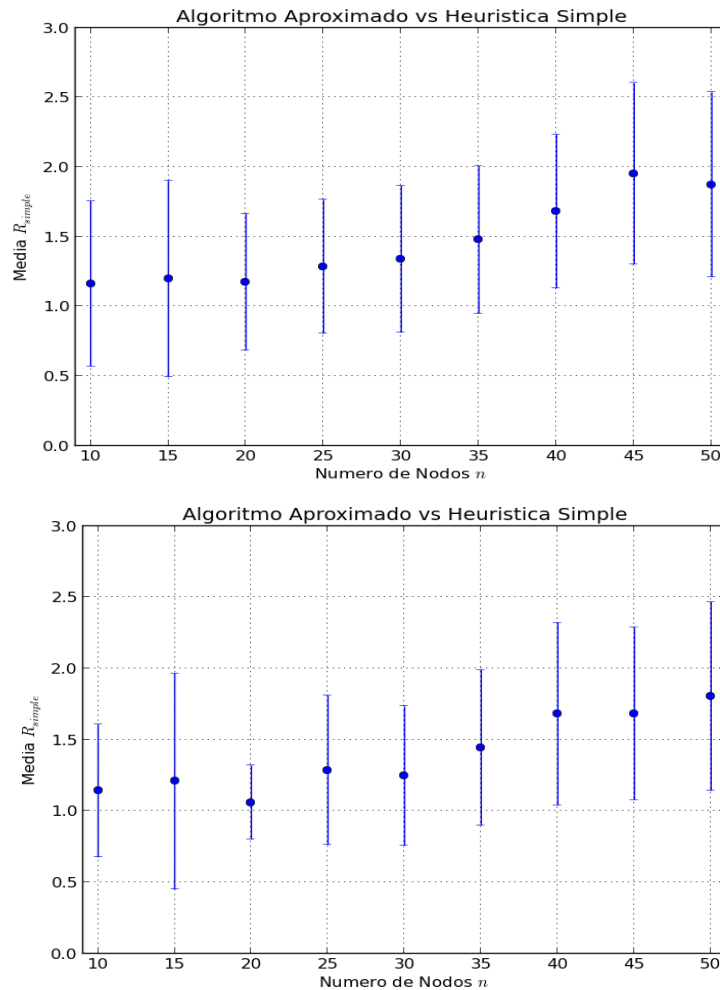
9.3 COMPARACIÓN CON LA HEURÍSTICA SIMPLE

Para lograr datos que permitan una comparación bastante buena de los dos algoritmos (TC-ALGO, heurística simple), se generan grafos con número de nodos $n = 10, 15, 20, \dots, 50$. Para cada valor se consideran 50 grafos diferentes. Para cada grafo se calcula la relación del costo total C_{simple} de la heurística simple con referencia en el costo total C_{aprox} del algoritmo aproximado TC-ALGO mediante la fórmula:

$$R_{simple} = \frac{C_{simple} - C_{aprox}}{C_{aprox}} \quad (11)$$

Para diferentes valores de n , se promedia, y por último, se calcula la desviación estándar de cada dato:

Figura 7 Comparación Algoritmo Aproximado Vs Heurística Simple



10. ANALISIS DE RESULTADOS

Haciendo uso de los algoritmos explicados en la sección anterior y utilizando la georeferenciación de cada una de los puntos se realiza el diseño de la topología de red en la zonas rurales de la región del Sumapaz como objetivo del plan de diseño físico de red para el proyecto de investigación denominado “Realización del estudio de factibilidad, socialización y capacitación, para implementación de

infraestructuras de voz IP y comunicaciones convergentes en la región del Sumapaz (Cesar, Leonardo, & Luis, 2013)”, del grupo de investigación GIGATT de la Universidad de Cundinamarca.

La región del Sumapaz consta de 10 municipios que son Arbeláez, Cabrera, Fusagasugá, Granada, Pandi, Pasca, San Bernardo, Silvania, Tibacuy y Venecia. La población rural es el 41% del total regional, cerca de 84.549 habitantes según estimaciones para el 2011 (Calad, s.f.).

Las adversas condiciones económicas y de acceso a las tecnologías de la información, hacen que este proyecto busque evaluar la viabilidad y conseguir alternativas económicas de diseño e implementación de redes, en este aspecto este trabajo busca manipular los principales costos involucrados en la implementación física de redes de comunicaciones rurales. Un aspecto importante en la construcción de redes rurales es el costo que esto conlleva, debido a la baja densidad de población y al bajo poder económico que caracteriza a dicha población. Los costos más grandes en el desarrollo de la red están dados por la infraestructura y los equipos.

Si se tiene cuenta que la topología de red rural es fija; esto significa que cada nodo de la red tiene una posición permanente; y que los enlaces requieren distancias relativamente grandes, esto hace que la cantidad y altura de las obstrucciones sea considerable, es necesario para constituir un enlace a larga distancia (mantener línea de vista entre las antenas), se requiera una altura determinada para las torres que las soportan, de tal forma que estén por sobre los obstáculos (árboles, construcciones y terreno) (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008).

10.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA DE RED

El diseño de la red pretende conseguir las condiciones óptimas para que el funcionamiento de la transmisión y la buena prestación de los servicios, dentro de estas características se evalúan las siguientes:

- Máxima cobertura. El establecer los nodos y la posible población objetivo se busca que la red esta interconectada de tal manera que dicha población obtenga el máximo beneficio de la red. Fuera de las consideraciones del diseño lógico el diseño físico permite alcanzar a los usuarios, y llevar a ellos los servicios implementados. Además, se busca que cada punto esté conectado, esto involucra determinar los puntos con los cuales se puede establecer un enlace económico y confiable, sobrepasando las obstrucciones en el trayecto. Cada enlace permite que existan una o varas conexiones físicas en cada punto permitiendo que la red cuente con más de una posibilidad de enrutamiento, agregándole robustez al sistema. Evidente que entre más conexiones físicas se logren se consigue un beneficio, el cual estaría determinado por el número de enlaces de la red.

- Minimización de costos. En cuanto a la minimización de costos, que como ya se ha dicho es un parámetro determinante en la construcción de redes rurales, y debido a que la ubicación de las antenas está predeterminada por la ubicación de cada nodo es importante buscar una solución que obtenga para cada punto la conexión a la red con un menor costo. Esto obliga a evaluar todas las posibles conexiones en cada nodo y escoger la menos costosa y de esta forma alcanzar una topología de red económica, y que además logre tener un beneficio máximo. Entonces, el valor de cada enlace estará determinado por cuán bajo es la relación costo beneficio que representa, lo que quiere decir que el costo de establecer un enlace debe asegurar la posibilidad de obtener más enlaces a partir del anterior. La relación costo beneficio r se evalúa de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum_{n=1}^k C_n}{k}$$

Donde C_n es el valor en determinado punto n y k es el número de enlaces.

10.2 CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA INICIAL

Para la creación de la topología inicial se cuenta con una VPN que uniría por medio de fibra óptica (ya establecida en la actualidad por operadores de servicios de telecomunicaciones de tipo privado) a las 10 cabeceras municipales en la región, y de allí se ubicarían 10 redes inalámbricas que permitirán el acceso a las escuelas rurales.

Así cada escuela hará parte de una subred establecida por un punto de acceso en cada cabecera municipal y cuantas escuelas rurales se puedan conectar por municipio.

Para tener un conocimiento preliminar de dicha topología que está determinada por la ubicación geográfica de cada escuela y por las características del terreno. Se hace uso de información que se encuentra disponible en mapas geográficos realizados mediante el uso de satélites, estos mapas son parte del proyecto SRTM de la NASA.

Al adquirir el mapa de la región se procede a ubicar por medio de sus coordenadas geográficas cada escuela y cabecera municipal en la red.

Posteriormente se evalúa el perfil del terreno presente entre cada par de nodos que conforman un enlace.

10.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE LA TOPOLOGÍA

La creación de la topología de red inalámbrica en casos donde se tiene un número de nodos n elevado ($n > 5$) resulta dificultoso realizar los cálculos adecuados que permitan obtener valores de altura óptimos en las estructuras de soporte de las antenas. Estas alturas son determinantes para establecer un enlace directo entre un par de nodos (u, v) , y de ahí partir para conseguir que toda la red este completamente conectada, para ello la altura de un nodo cualquiera u no solo ha de satisfacer un enlace directo con un nodo v , sino que también para cualquier otro nodo w de la red, esto hace que la cantidad de enlaces aumente y logra conseguir la condición de conectividad buscada.

Debido a lo anterior es importante realizar una búsqueda no solo de altura sino de los enlaces óptimos que requiere la topología. El número de enlaces e , entonces, aumentaría la complejidad del diseño físico de la red, siendo $e = \binom{n}{2}$ para una red totalmente conectada (sí $5 \leq n \leq 20$, $10 \leq e \leq 190$).

La topología inicial corresponde a una red que se representa por un grafo no dirigido $G(V, E)$ que determina la estructura de red, donde V es el conjunto de nodos y E el conjunto de enlaces aristas. El grafo inicial es un grafo completo lo que quiere decir que todos los nodos u tienen un enlaces con cualquier otro nodo v en la red. Dicho de otra forma para un número de nodos n el número de enlaces no dirigidos e es igual a la combinatoria de n en 2.

10.3 OBTENCIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO

Entre dos nodos físicos en una red (u, v) , existe a lo largo de la distancia que los separa una cantidad de obstrucciones dada, debido a la topografía regional y a la vegetación. El perfil del terreno corresponde a la disposición geométrica construida por todas las obstrucciones presentes en el trayecto del enlace.

Al tener las posiciones geográficas de cada nodo en la red, y al establecer los enlaces en un diseño de topología de red inicial, es posible, obtener un perfil de obstrucciones relativo a cada enlace. Por medio de manipulación de mapas

satelitales de elevación del terreno, se posicionan en el mapa determinado según sus coordenadas los nodos (u , v) y luego mediante interpolación se seleccionan los valores que corresponden a las posiciones geográficas que se encuentran sobre la línea recta que relaciona los dos nodos.

Además es importante despejar la primera zona de Fresnel (Rappaport & others, 1996) lo cual se consigue sumando el radio de la zona de Fresnel al perfil del terreno. El radio de la primera zona de Fresnel corresponde a:

$$r_n = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \quad (2)$$

Donde λ corresponde a la longitud de onda de la señal transmitida, d_1 y d_2 son las distancias desde cada uno de los nodos u y v respectivamente.

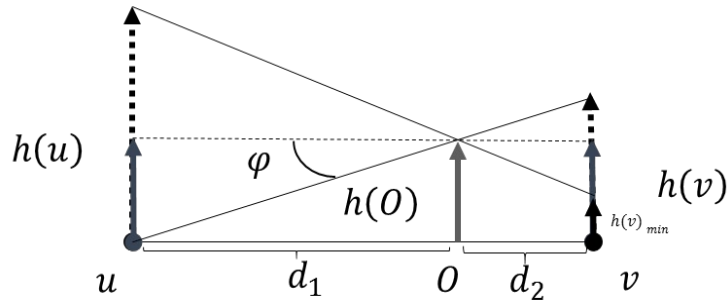
10.4 ALTURA MÁXIMA DE OBSTRUCCIÓN

El objetivo de conseguir un perfil del terreno en el trayecto de cada enlace en la red, es el poder identificar la mayor obstrucción que se presenta, y esta será determinante en el costo de establecimiento del enlace. Esta obstrucción aumenta según el radio de la zona de Fresnel calculado para la distancia en la que se encuentra con respecto al centro de la trayectoria del enlace.

Al calcular las alturas $h(u)$ y $h(v)$ de manera que la línea recta imaginaria que las une este por sobre la obstrucción es claro que fácilmente $h(u), h(v) = h(O)$ para simplicidad de diseño se supone la obstrucción máxima en la mitad de la trayectoria por lo que la sumatoria de las dos alturas en los enlaces debe ser mínimo $2h(O)$.

En un conjunto de datos que representan el perfil es fácil encontrar el valor máximo que representa la mayor obstrucción, sin embargo, la altura en cada nodo que corresponde a la altura de en la que se deben colocar las antenas dependen de la altura de la obstrucción y de la posición de esta a lo largo de la trayectoria del enlace.

Figura 8 Determinación de la altura intermedia máxima de un enlace



Al calcular las alturas $h(u)$ y $h(v)$ de manera que la línea recta imaginaria que las une este por sobre la obstrucción es claro que fácilmente $h(u), h(v) = h(O)$ en este caso la sumatoria de las dos alturas en los enlaces corresponde $2h(O)$. Sin embargo para cualquier altura en $h(u)$ pertenecerá un valor en $h(v)$, dicha altura corresponde a la ecuación:

$$h(v) = h(O) - d_2 \left(\frac{h(u) - h(O)}{d_1} \right) \quad (12)$$

De esta forma para que se cumpla un enlace (u, v) la sumatoria de $h(u)$ y $h(v)$ tendrá un valor mínimo de:

$$h(u) + h(v) = h(u) + h(O) - d_2 \left(\frac{h(u) - h(O)}{d_1} \right) \quad (13)$$

10.5 GRAFO INICIAL

Para asegurar el requerimiento de conectividad el grafo de entrada $G_i(V_i, E_i)$ se establece completamente conectado, es decir, cada nodo tiene comunicación directa con cualquier otro nodo en el grafo, y el costo de este enlace proviene de su altura, la cual es determinada por las obstrucciones en el trayecto del enlace, de la distancia entre los nodos y de cada nodo a la obstrucción. Esto determina en cierto modo la complejidad del algoritmo: el tamaño de la obstrucción y las distancias relacionadas son datos tomados de mapas satelitales de elevación del terreno, lo cual hace que los valores que les corresponden sean aleatorios y de dimensiones poco predecibles.

La región del Sumapaz al estar ubicada en la cordillera central, alcanza alturas elevadas de hasta a que oscilan entre los 700m y 2500m esto imposibilita que el

grafo que representa la topología de red real, este completamente conectado con respecto a los condicionamiento físico para el establecimiento de los enlaces.

Por lo anterior antes de que el grafo sea tratado por el algoritmo TC-ALGO, es necesario descartar los enlaces que no cumplen el valor de altura máxima h_{max} , esto se realiza de forma básica eliminando los enlaces que no cumplen con la siguiente condición:

$$\max(h_o(u, v)) \leq h_{max}$$

Donde $h_o(u, v)$ es la función de obstrucciones en el trayecto del enlace la cual describe el perfil del terreno entre los nodos u y v .

Esta selección es importante para el correcto funcionamiento del algoritmo TC-ALGO, dado que lo que se quiere obtener es que los valores de altura, así como los costos relacionados sean coherentes con los límites de altura definidos. Dado que si existen valores mayores a h_{max} , que es el margen de altura buscado, el costo resultaría prohibitivo.

Un costo prohibitivo puede generar que el algoritmo no encuentre como conectar un determinado nodo u , en el enlace (u, v) el cual su altura $h_{omax}(u, v)$ es prohibitiva, con el componente $COVER(h)$, ocasionando que $COMP(h)$ nunca sea igual a 1, condición que hace que el algoritmo nunca termine.

Dado un enlace (u, v) el cual su altura $h_o(u, v)$ es prohibitiva, es decir $h_o(u, v) > h_{max}$ debe ser descartado de manera que su costo $c(h_o(u, v)) < c(h_{max})$, garantizando que, en algún momento $COMP(h) = 1$.

El proceso de eliminación puede generar que uno o varios nodos no estén conectados, estos deben ser eliminados del grafo inicial G_i , debido que no van a ser accesibles por ningún otro nodo, generando el problema de conectividad descrito anteriormente. Este tipo de selección y eliminación de nodos no es deseable desde el punto de vista de conectividad, para ello se implementa el algoritmo REP-ALGO, el cual agrega nodos en posiciones donde es más probable conseguir un grafo completamente conectado, aun luego del proceso de selección. Entonces el grafo inicial $G_i(V_i, E_i)$, es un subgrafo conectado del grafo de entrada $G(V, E)$ donde $E_i \subseteq E$ y $V_i \subseteq V$, y para cada enlace (u, v) en E_i existe La altura

máxima de obstrucción $h_{omax}(u, v)$ que cumple la condición anterior, además, todo nodo v en V_i con un conjunto de nodos vecinos nbr tal que $nbr \neq \emptyset$.

10.6 ALGORITMO REP-ALGO

El algoritmo REP-ALGO determina los puntos óptimos para el despliegue de repetidores, ubicándolos geográficamente y clasificándolos según el beneficio que aportan a la red, realizando una búsqueda sobre los mapas de elevación del terreno.

Inicialmente se demarca un área efectiva de radiación A_{ir} , representada por los puntos en los cuales un nodo central u perteneciente a V tenga línea de vista física.

Un nodo central u comprendido por una antena directiva, al que se le supone que so patrón de radiación alcanza una distancia de radiación r , en el caso que las obstrucciones fuera inexistentes podría se dirigida a cualquier punto dentro de un área circular de radio r . Entonces la circunferencia con centro en $v(lon, la)$ (la es la latitud y lon la longitud en su posición geográfica) y limites en cualquier punto $u(lon_u, la_u)$ tal que:

$$r = \sqrt{(lon_u - lon)^2 + (la_u - la)^2}$$

Para cada punto en la circunferencia $u(lon_u, la_u)$ se evalúa el perfil del terreno $per(u, v)$ con respecto a $v(lon, la)$. Una vez obtenido, dicho perfil se recorre desde el nodo u al nodo v y para cada valor de distancia Δd se devuelve el valor de altura $h_{\Delta d}$ correspondiente, luego se calcula la pendiente de la siguiente forma.

$$\delta_o = \frac{h_{\Delta d}}{\Delta d}$$

Para este valor de pendiente se retorna una posición que depende de la distancia de Δd , esta posición se guarda en un conjunto que constituirá el área efectiva de radiación sobre el mapa de elevación del terreno. La siguiente posición se obtiene calculando la pendiente δ_1 de la altura $h_{\Delta d1}$ subsiguiente a $h_{\Delta d}$, a una distancia $\Delta d1$ del nodo u , si $\delta_1 > \delta_o$ entonces la posición que depende de $\Delta d1$ está contenida en A_{ir} .

Para cada nodo u se calcula su correspondiente A_{ir} , luego se elabora una comparación para poder categorizar que puntos en el mapa tienen mayor beneficio. El beneficio de un punto sobre un mapa está determinado a su pertenencia a un área contenida en A_{ir_u} que presente mayor número de intersecciones con el área de radiación A_{ir_w} de los demás nodos en la red, dicho de otra manera el beneficio de un punto (lon_ϕ, la_ϕ) en la red está establecido por la cantidad de A_{ir} en nodos distintos a los que pertenece.

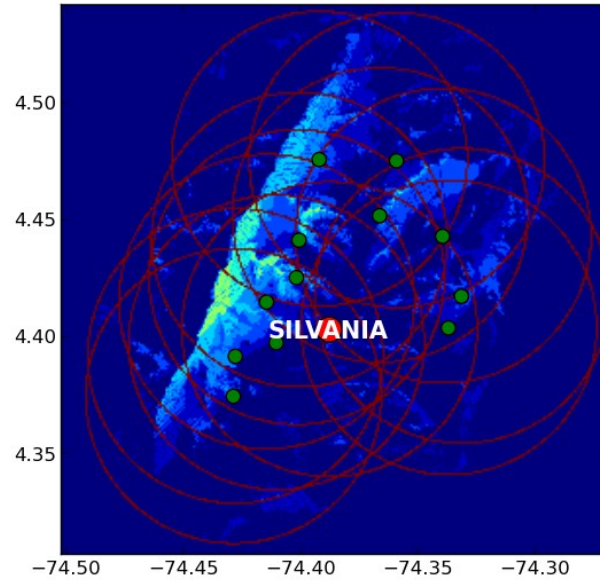
Esta clasificación de las áreas de radiación permite establecer en las áreas de mayor intersección un nodo repetidor que conectara a bajo costo la mayor cantidad de nodos posible. El uso de este algoritmo es de especial atención, dado que si bien permite conseguir que la red este completamente conectada a un bajo costo, la posición en la que se establece cada repetidor no cuenta de ante mano con un diagnóstico del terreno, y en el contexto real se imposibilite su uso. Pero representa una solución eficaz del problema de conexión y parcialmente del problema de reducción de costos.

ALGORITMO 4. Algoritmo REP-ALGO

REP_ALGO (M_{srtm}, V_{cg}, V, r)

- 1 **Entrada :** Mapa en formato HGT M_{srtm} , conjunto de posiciones geográficas para cada nodo en el grafo V_{cg} , conjunto de nodos V , radio del área de irradiación r
- 2 **Salida:** conjunto de posiciones geográficas de los nuevos nodos de repetición rep
- 3 **Para** cada nodo v en V **hacer:**
- 4 $Cir(lon_\phi, la_\phi) := \emptyset$ es la función de posiciones geográficas que determina los límites del área de irradiación.
- 5 $(lon_v, la_v) :=$ representan la posición geográfica de v , donde la es latitud y lon la longitud.
- 6 $di2coo((\overrightarrow{dlon_\phi}, \overrightarrow{dla_\phi}), (lon_v, la_v), M_{srtm}) :=$ convierte las distancias $(\overrightarrow{dlon_\phi}, \overrightarrow{dla_\phi})$ en sus correspondientes coordenadas geográficas (lon_ϕ, la_ϕ) a partir del punto (lon_v, la_v)
- 7 $per((lon_v, la_v), (lon_u, la_u)) :=$ devuelve el perfil del terreno del punto u al v según el mapa de alturas M_{srtm} , contiene un conjunto de puntos de

Figura 9 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño inicial de la topología grafo de entrada G



Al conocer el perfil del terreno y las obstrucciones máximas en cada enlace de la red, y luego de generar la topología de red inicial se procede a utilizar el algoritmo TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) que procura una topología de red óptima en el cual los parámetros de entrada los constituye el grafo inicial G y una ecuación de costos determinada por:

$$c(h) = \begin{cases} 750\,000 & \text{si } 0 \leq h \leq 20m \\ 650\,000 h + 1\,000\,000 & \text{si } 30m \leq h < 20m \end{cases} \quad (14)$$

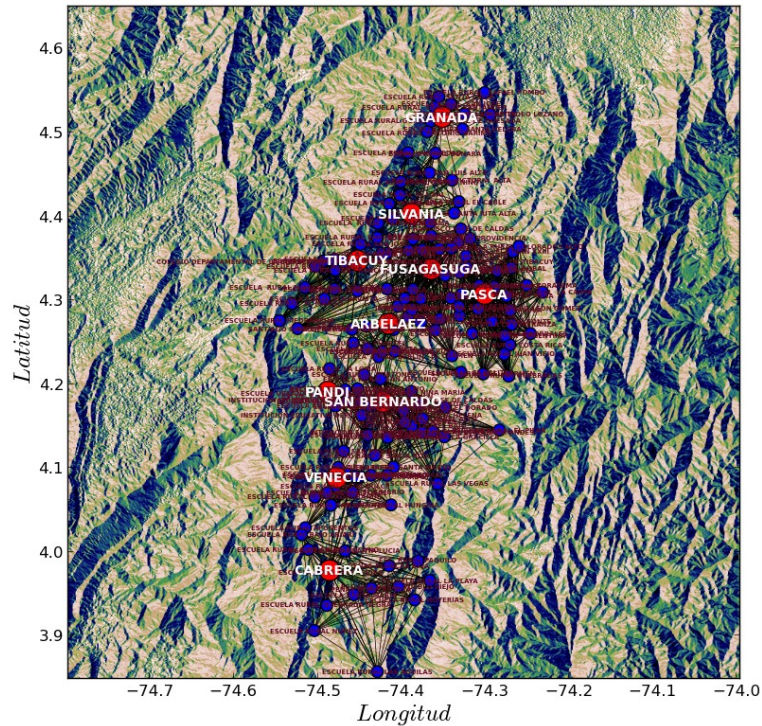
Se establece $h_{max} = 30m$ y $h_{min} = 20m$.

Dicho grafo de entrada G constituye la topología de red planteada inicialmente, con valores de obstrucción propios del relieve del contexto de la red, en este caso de la región del Sumapaz. La densidad del grafo G es de uno, es decir que el grafo está completamente conectado. La densidad del grafo representa la relación que existe entre el número de nodos y el número de enlaces cuya representación matemática es:

$$d = \frac{2e}{n(n-1)} \quad (15)$$

Donde e es el número de aristas y n es el número de nodos del grafo, esta relación corresponde a un grafo no dirigido.

Figura 10 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño inicial de la topología grafo de entrada



Dicho grafo está conformado por 11 componentes los cuales constituyen el grafo completo del Sumapaz, 10 subgrafos que describen la topología de las redes inalámbricas en cada uno de los municipios y el subgrafo correspondiente a la VPN que uno por fibra óptica las 10 cabeceras municipales, este último al no ser inalámbrico no es determinante en el propósito de este trabajo por lo que no se le aplica corrección alguna. De manera que, para cada subgrafo denominado como el municipio al que pertenece, debe ser tratado individualmente por el algoritmo de optimización TC_ALGO.

Con el fin de obtener una comparación de desempeño se aplica también el algoritmo de heurística simple evaluando el MST (mínimo árbol expandido) de G , luego se realizan dos simulaciones distintas con y sin el uso de repetidoras, con esto se evalúa el desempeño del algoritmo REP-ALGO.

El grafo de entrada G completamente conectado está compuesto por los siguientes componentes:

Municipio	Cantidad de nodos	Cantidad de enlaces completamente conectado
Silvania	13	78
Fusagasugá	25	300
Tibacuy	15	105
Cabrera	15	105
San Bernardo	21	210
Granada	10	45
Pandi	13	78
Pasca	28	378
Arbeláez	11	55
Venecia	14	91
TOTAL	165	1445

Al aplica luego de realizar la selección de los enlaces que cumplen las condiciones de altura, se obtienen los componentes del grafo inicial G_i , con los siguientes elementos:

Municipio	Cantidad de nodos	Cantidad de enlaces	Cantidad de nodos descartados
Silvania	13	36	0
Fusagasugá	23	89	2
Tibacuy	5	5	10
Cabrera	8	8	7
San Bernardo	16	39	5
Granada	8	31	2
Pandi	6	10	7
Pasca	26	134	2
Arbeláez	9	16	2
Venecia	9	12	5
TOTAL	123	380	42

Como se puede observar la topología inicial disminuye la cantidad de nodos en un 29,3%, impidiendo que todos los nodos planteados estén conectados a la red, aunque la red estará conformada por un subgrafo del nodo de entrada G con menor cantidad de nodos y enlaces

Los siguientes resultados se obtienen al aplicar el algoritmo de repetidoras REP-ALGO para la generación del grafo de entrada G .

Municipio	Cantidad de repetidoras	Cantidad nodos	de Cantidad de enlaces completamente conectado
Silvania	1	13	78
Fusagasugá	1	25	300
Tibacuy	3	15	105
Cabrera	5	15	105
San Bernardo	3	21	210
Granada	2	10	45
Pandi	3	13	78
Pasca	1	28	378
Arbeláez	1	11	55
Venecia	3	14	91
TOTAL	23	165	1445

Luego del proceso de selección se obtiene el siguiente grafo G_i .

Municipio	Cantidad de nodos	Cantidad enlaces	de Cantidad de nodos descartados
Silvania	14	46	0
Fusagasugá	29	162	0
Tibacuy	18	42	0
Cabrera	20	48	0
San Bernardo	24	80	0
Granada	10	31	2
Pandi	15	34	0
Pasca	31	185	
Arbeláez	14	38	0
Venecia	15	43	2
TOTAL	190	709	4

Se puede observar que si bien se aumenta considerablemente el tamaño de la red, se consigue una relación de conexión de la red del 97.06%, el aumento de toda la red con relación al grafo de entrada fue del 53. 22% y del 123% si lo comparamos con el grafo inicial sin repetidoras. La densidad del grafo inicial disminuyo del 65% al 4%.

10.7 APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN TC-ALGO

El algoritmo TC-ALGO (Panigrahi, Duttat, Jaiswal, Naidu, & Rastogi, 2008) se encarga de la búsqueda en cada nodo u del incremento de altura δ que obtenga la mayor cantidad de enlaces a un costo óptimo, esta búsqueda se realiza mediante la subrutina START-TC-ALGO esta evalúa los nodos vecinos a u sus enlaces y los incrementos que permiten establecer enlaces por sobre las obstrucciones, las cuales se representan por el peso (weight) (Harju, 2011) del enlace o arista.

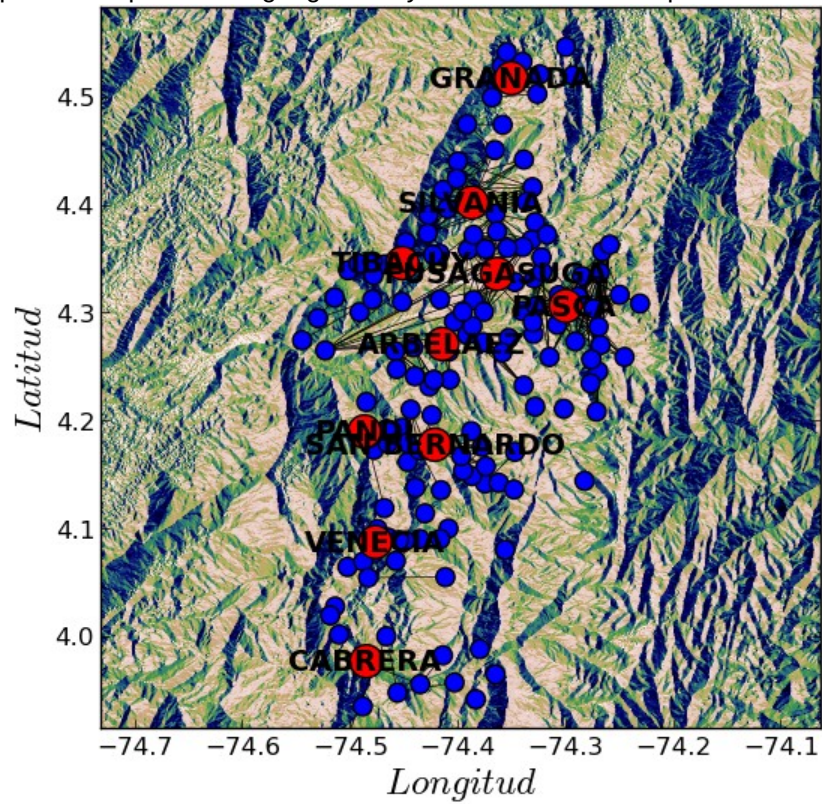
Cada enlace o grupo de estos conforma un nuevo componente dentro del grafo, existirán enlaces que aseguren la conexión entre dos o más componentes de forma que cuando se consiga un solo componente el grafo final llamado $COVER(h)$ estará completamente conectado.

Al ejecutar el algoritmo para la topología de red inicial, se consigue un nuevo grafo que representa una solución bastante óptima, con una densidad (Harju, 2011) menor que el grafo inicial. Los resultados obtenidos son:

Topología TC-ALGO					
Municipio	Nodos	Aristas	Costo total en millones de pesos	Relación costo beneficio	Densidad
Silvania	13	27	3,9	0,14	0,51
Fusagasugá	23	77	34,95	0,45	0,38
Tibacuy	5	4	3	0,75	0,18
Cabrera	8	7	2,1	0,30	0,23
San Bernardo	16	35	42,77	1,22	0,23
Granada	8	8	0	-	0,33
Pandi	6	10	41,95	4,20	0,30
Pasca	26	105	7,2	0,07	0,38
Arbeláez	9	16	56,05	3,50	0,42
Venecia	9	12	96,3	8,03	0,41
Total	123	301	288,22	18,66	0.95

La topología MTS se describe mediante el siguiente esquema, el cual está diseñado a partir del mínimo árbol expandido de G_i . La siguiente valores muestra la cantidad de repetidora agregada y el tamaño de. El nuevo grafo de entrada.

Figura 11 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño elaborado por TC-ALGO

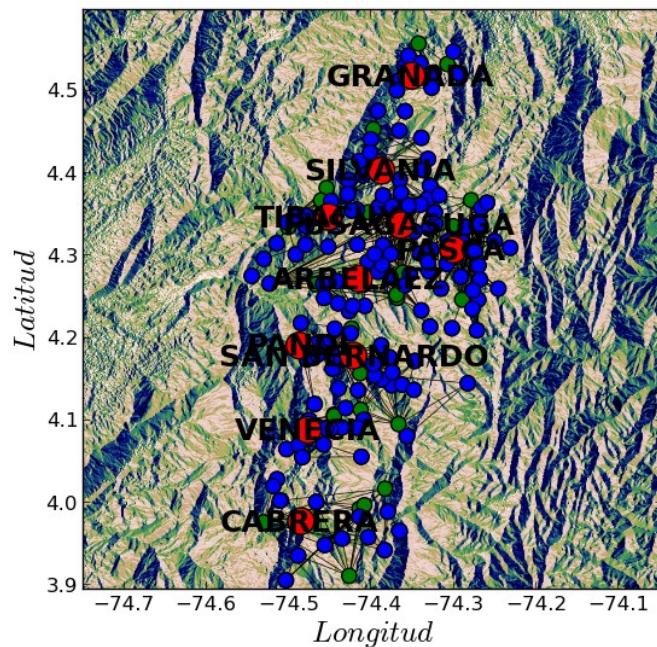


Topología MST					
Municipio	Nodos	Aristas	Costo total en millones de pesos	Relación beneficio	costo
Silvania	13	12	3	0,25	
Fusagasugá	23	22	38,15	1,73	
Tibacuy	5	4	3	0,75	
Cabrera	8	7	16,5	2,35	
San Bernardo	16	15	64,06	64,06	
Granada	8	7	0	0	
Pandi	6	5	39,7	7,94	
Pasca	26	25	1,95	0,07	
Arbeláez	9	8	34,5	4,31	
Venecia	9	8	69,67	8,70	
Total	123	113	270,53	2,44	

Los datos generados luego del algoritmo de optimización TC-ALGO para una red con repetidora son:

Topología TC-ALGO					
Municipio	Nodos	Aristas	Costo total en millones de pesos	Relación costo beneficio	Densidad
Silvania	14	46	10,5	0,23	0,51
Fusagasugá	29	154	206	1,34	0,38
Tibacuy	18	27	13,5	0,50	0,18
Cabrera	20	44	116,35	2,64	0,23
San Bernardo	24	63	18	0,29	0,23
Granada	10	15	7,5	0,50	0,33
Pandi	15	31	140,15	4,52	0,30
Pasca	31	178	267,9	1,51	0,38
Arbeláez	14	38	34,15	0,90	0,42
Venecia	15	43	117,8	2,74	0,41
Total	190	639	931,85	1,46	1,41

Figura 12 Mapa con las posiciones geográficas y el diseño elaborado por TC-ALGO con repetidoras (verde)



El algoritmo MTS genera los siguientes datos para el grafo inicial con repetidoras.

Topología MTS						
Municipio	Nodos	Aristas	Costo total en millones de pesos	Relación costo beneficio	Densidad	
Silvania	14	13	10,5	1	0,8	0,14
Fusagasugá	29	28	53,45		1,9	0,07
Tibacuy	18	17	13,5	9	0,7	0,11
Cabrera	20	19	83,6	0	4,4	0,10
San Bernardo	24	23	32,55	2	1,4	0,08
Granada	10	9	7,5	3	0,8	0,20
Pandi	15	14	76	3	5,4	0,13
Pasca	31	30	66,1	0	2,2	0,06
Arbeláez	14	13	47,4	5	3,6	0,14
Venecia	15	14	42,95	7	3,0	0,13
Total	190	180	433,55	1	2,4	2,46

Como se observa los costos aumentan entre algoritmo TC-ALGO con el MST, que para el primer caso (sin repetidoras) el resultado de TC-ALGO es un 6% mayor que el MST, aunque su relación para este último resulta más grande.

Al aplicar las repetidoras el costo total de la red se eleva en un 223% para el algoritmo TC-algo con repetidoras en comparado con los resultados del mismo algoritmo sin repetidoras. Al mismo análisis se realiza en el MTS que resulta ser el que tiene repetidoras un 60%, la relación costo beneficio aumento, pero estuvo más baja aún, la del algoritmo TC-ALGO que la del MST.

El grafo con repetidores evaluado por el algoritmo Tc-ALGO resulto 115% más elevado que los resultado obtenidos por el algoritmo MST.

La información de costos de los datos generados por el algoritmo se resume en la siguiente tabla.

Municipio	Costo total TC-ALGO 97% de conexión en millones de pesos	Costo total MST con un 97% de conexión en millones de pesos	Costo total TC-ALGO 29% de conexión en millones de pesos	Costo total MST con un 29% de conexión en millones de pesos
Silvania	10,5	10,5	3,9	3
Fusagasugá		53,45		38,15
Tibacuy	206		34,95	
Cabrera	13,5	13,5	3	3
San	116,35	83,6	2,1	16,5
Bernardo		32,55		64,06
Granada	18		42,77	
Pandi	7,5	7,5	0	0
Pasca	140,15	76	41,95	39,7
Arbeláez	267,9	66,1	7,2	1,95
Venecia	34,15	47,4	56,05	34,5
Total	117,8	42,95	96,3	69,67
	931,85	433,55	288,22	270,53

11. CONCLUSIONES

La instalación de torres se rige por varias normas que establecen parámetros de calidad y seguridad tanto para los operarios como para los usuarios, generando en una red confiable y que cumpla con las características especificadas el servicio que se ofrece. El diseño de los sistemas de protección y alimentación eléctrica están basados en el cumplimiento de estas normas. Los sistemas de protección más implementados son los interruptores termo-magnéticos de línea, la puesta a tierra, los sistemas de pararrayos.

Los sistemas de alimentación eléctrica para telecomunicaciones, son usualmente, la conexión a la red de distribución y los sistemas fotovoltaicos. Se determinaron tres modelos de sistemas consumo el modelo de usuario, repetidor y al modelo de usuario-repetidor, cada uno identificado con cargas de consumo diferentes, que permitieron plantear el diseño de los sistemas de alimentación y protección eléctrica.

La construcción de una red rural inalámbrica tiene especiales criterios de diseño entre ellos el de minimización de costos resulta primordial, puesto que la capacidad económica de la población es limitada. Una red inalámbrica cuenta con los equipos de telecomunicaciones (antenas, enrutadores, procesadores, etc) y con las estructuras que lo soportan. Los costos más representativos están distribuidos en estas últimas, dado que los costos de los equipos son muy inferiores, los métodos de optimización resultan más eficaces aplicados a las estructuras de soporte. Dentro de dichas estructuras están los mástiles tubulares y las torres arriostradas o venteadas, estas últimas superan en tamaño y valor a los mástiles que resultan fáciles de implementar y muy económico, salvo que para alturas mayores a 20 m no es recomendable su uso. Mientras que las torres de acero ventadas, con respecto a las estructuras de acero las más económicas, pueden alcanzar alturas hasta de 90 m, y satisfacer las necesidades de elevación y carga que se requiere para la implementación en las redes rurales.

Para contextualizar el costo de las torres en la región se realizaron diversas cotizaciones, que dieron información para construir un modelo de costos con respecto a la altura de las torres, el cual es una función por partes donde la variación inicial corresponde a los mástiles tubulares, los cuales son identificados por un valor medio constante. Los costos de las torres ventadas se modelan por medio de una recta de pendiente determinada por el costo de las secciones de torre con una longitud de 3 m, además estos costos dependen de un factor que se evidencia en cualquier torre de cualquier altura, y que dependen de la cimentación, las riendas, los sistemas de protección y demás implementos que se requiera. De este modo la función de costos con respecto a la altura queda de la siguiente manera. El diseño de la se representa por un grafo $G(V, E)$, donde V es el

conjunto de nodos y E el conjunto de enlaces o aristas. Una función definida de costos $c(h)$ con dominio en la altura de las torres modela el costo de construir una torre de altura $h(v)$ para un nodo v en V que permita un enlace directo (v, u) con otro nodo u en el grafo. Un subgrafo conectado y expandido es llamado $COVER(h)$ para representado por un conjunto de nodos que son cubiertos por una función de altura h . El costo de construir todos los enlaces en la red es $\sum_{v \in V} c(h(v))$. El logro está en encontrar una función de alturas h que retorne el mínimo costo total de la red. Un algoritmo que trata este tema es TC-ALGO.

TC-ALGO es un algoritmo que trata el problema de construcción de la topología de red, usa unas rutinas voraces de búsqueda que obtiene la mínima relación costo beneficio para establecer un enlace. Entre más baja sea la relación costo beneficio menor se pagara por una cantidad de enlaces mayor.

Al implementar el algoritmo TC-ALGO, se generó otro algoritmo con sintaxis más evidente conocido por algoritmo de heurística simple que se basa el árbol mínimo expandido MST. Se realizaron pruebas de desempeño con condiciones específicas. Se creó una topología sintética dentro de un área de radio de 25 km y con alturas no mayores a 20 m. Estas pruebas arrojaron un desempeño mejor del algoritmo aproximando TC-ALGO que estaba entre 1 y 2,2 veces más bajo que el algoritmo de heurística simple.

Al limitar la altura de las antenas existe el problema de tener que eliminar nodos para que la topología se pueda realizar bajo una características de conexión establecida, para este problema se realizó el algoritmo REP-ALGO que adiciona nodos a la red para conectar los que deberían ser eliminado por la restricción de altura. Dicho algoritmo permitió elevar la relación de conexión del 29% al 97%.

Finalmente se realizó el diseño de la topología de red en la región del Sumapaz, demostrando que aunque la topografía de la región es muy obstructiva se obtuvieron valores bajos de costo y altura. El costo generado por el algoritmo de heurística simple estuvo entre 270 y 433 millones de pesos colombianos, para TC-ALGO se obtuvieron entre 288 y 931 millones de pesos, sin embargo, los valores de costo benéfico fueron más bajos para TC-ALGO.

Al limitar la altura de las antenas existe el problema de tener que eliminar nodos para que la topología se pueda realizar bajo una características de conexión establecida, para este problema se realizó el algoritmo REP-ALGO que adiciona nodos a la red para conectar los que deberían ser eliminados por la restricción de altura. Dicho algoritmo permitió elevar la relación de conexión del 29% al 97%.

Bibliografía

- Cesar, C., Leonardo, R., & Luis, G. (2013). realización del estudio de factibilidad, socialización y capacitación, para implementación de infraestructuras de voz IP y comunicaciones convergentes en la región del Sumapaz. *SIUDEC*.
- Dasgupta, S., Papadimitriou, C. H., & Vazirani, U. (2006). *Algorithms*. McGraw-Hill, Inc.
- de Minas y Energía, M. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Electricas RETIE 2013. *Reglamento Técnico de Instalaciones Electricas RETIE 2013*. Bogotá.
- Dutta, P., Jaiswal, S., Panigrahi, D., Naidu, K., Rastogi, R., & Todimala, A. (2007). Villagenet: A low-cost, 802.11-based mesh network for rural regions. *Communication Systems Software and Middleware, 2007. COMSWARE 2007. 2nd International Conference on*, (págs. 1-8).
- Harju, T. (2011). Lecture notes on graph theory. *Department of Mathematics University of Turku-Turku, Finland*.
- ICONTEC. (23 de Julio de 2008). *Norma Técnica Colombiana - NTC 5613*. Obtenido de Referencias Bibliográficas. Contenido, forma y estructura: file:///C:/Users/Lorenita/Downloads/NTC5613.pdf
- ICONTEC. (23 de Julio de 2014). *Norma Técnica Colombiana - NTC 1486*. Obtenido de Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf
- Norma, N. (2013). NTC 2050. *Código Eléctrico Colombiano*.
- Panigrahi, D., Duttat, P., Jaiswal, S., Naidu, K., & Rastogi, R. (2008). Minimum cost topology construction for rural wireless mesh networks. *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*.
- Rappaport, T. S., & others. (1996). *Wireless communications: principles and practice* (Vol. 2). Prentice Hall PTR New Jersey.
- Rec, I. (2003). K. 56," Protection of radio base stations against lightning discharges. *International Telecommunication Union-ITU, Geneva*.
- Rendón, A., Ludeña, P., & Martínez, A. (2011). *Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para zonas rurales. Aplicación a la atención de salud en países en desarrollo*. Madrid (España).

- Romero, J. L. (2006). LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y DE LA COMUNICACIÓN EN LA EDUCACIÓN EN CUATRO PAÍSES LATINOAMERICANOS. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 11(28).
- S.A.C, T. (s.f.). *Torres Ventadas*. Recuperado el 2014 de 9 de 24, de <http://www.towertel.com.pe/torres-ventadas.php>
- Serrano, M. E. (s.f.). SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES. Obtenido de <http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/573/579/3190.pdf>
- TIA/EIA-222, A. (1996). NORMAS ESTRUCTURALES PARA TORRES Y ESTRUCTURAS DE ACERO PARA ANTENAS. *Elsevier Science Ireland Ltd. All rights reserved.*