

Contents

1	Capítulo 1. El problema	2
1.1	Planteamiento del problema	2
1.2	Objetivos del estudio	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Justificación	3
1.3.1	Beneficios tecnológicos	4
1.3.2	Beneficios institucionales	4
1.3.3	Beneficio social	5
1.4	Alcances y limitaciones	5
1.4.1	Alcances	5
1.4.2	Limitaciones	5
2	Capítulo 2. Marco referencial	6
2.1	Antecedentes	6
2.1.1	Descripción de la red de Bosachoque Libre	7
2.2	Marco Teórico	8
2.2.1	Brecha Digital	8
2.2.2	Redes Libres Comunitarias	9
2.2.3	Planeación de Redes Inalámbricas	10
2.2.4	Algoritmos utilizados en la planeación	10
2.2.5	Representación de la topología	11
2.3	ESTADO DEL ARTE	13
2.3.1	Planeación de redes móviles UMTS	13
2.3.2	Redes WiMAX	17
2.3.3	Redes BWA en zonas Rurales	19
3	Capítulo 3. Diseño metodológico	29
3.1	Generar el estado del arte de los algoritmos utilizados en la planeación de redes inalámbricas que permitan identificar y determinar los requerimientos del algoritmo que sugieran la mejor estrategia de expansión de una red	29
3.1.1	Recolectar información de planeación incremental de redes inalámbricas	29
3.1.2	Analizar la información recopilada de redes inalámbricas enfocada a zonas rurales	30
3.1.3	Determinar la información que cumpla con los requerimientos necesarios para diseñar el algoritmo	31
3.1.4	Documentar el estado del arte	31
3.2	Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales	31

3.2.1	Definir los datos de entrada y salida del algoritmo	32
3.2.2	Proponer el conjunto de operaciones secuenciales para la realización del Algoritmo	35
3.2.3	Determinar los requerimientos necesarios para ejecutar el algoritmo	38
3.2.4	Codificación del algoritmo	39
3.3	Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple	39
3.4	Aplicar el algoritmo propuesto en la Red Libre de Bosachoque analizando la topología adecuada para futuras expansiones de la red en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz-Cundinamarca considerando la relación costo-beneficio	39
4	Capítulo 4. Análisis de resultados y discusión	39
5	Conclusiones y trabajos futuros	39
	Bibliografía	39

1 Capítulo 1. El problema

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia, se puede apreciar la baja accesibilidad de banda ancha en zonas rurales, ya que de acuerdo con “Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe” dado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL,2017), menos del 10% de esta población tiene accesibilidad a servicio de banda ancha en el territorio nacional. Además, se espera que para los próximos años la comisión de regulaciones de las Comunicaciones aumente el ancho de banda para las zonas rurales, para el año 2020: 1 Mbps a 10 Mbps de bajada y de 512 Kbps a 1Mbps (CRC,2016), lo cual, si comparamos esto con los datos actuales que se tienen del ancho de banda en la red libre de Bosachoque (Florez, 2018), se puede evidenciar que no se alcanzara el nivel de banda ancha, por lo tanto, es necesario modificar la red, y para esto los Proveedores Inalámbricos de Servicios de Internet WISP solo pueden tomar dos acciones para extender su cobertura de banda ancha, estas son Incrementar la cobertura de red, o mejora las áreas ya existentes. En ambos casos, estas acciones son limitadas por el presupuesto y solo un pequeño conjunto de acciones pueden ser ejecutadas.

La planeación de redes se convierte en un proceso fundamental para estos casos, sin embargo, existen gran cantidad de software para el planeamiento de redes inalámbricas, pero estas herramientas a menudo no están disponibles, ni tampoco son

adecuados para comunicar pequeñas comunidades y pequeños WISP (en este caso la Universidad de Cundinamarca) (Bernardi, 2012). El difícil acceso a herramientas de planeación de redes inalámbricas limita la presencia de ISP en zonas rurales ya que ellos no saben con certeza como invertir en infraestructura que permita acceso a internet de banda ancha. Las comunidades excluidas de la banda ancha corren el riesgo de quedar al margen de toda una gama de aplicaciones y ventajas que proporciona Internet, dejando a un lado la posibilidad de generar un desarrollo económico (Ginebra, 2012).

¿Cómo planificar la expansión estratégica de la Red Libre de Bosachoque con un algoritmo de planificación de redes inalámbricas en zonas rurales?

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas en áreas rurales evaluándolo en la red Libre de Bosachoque

1.2.2 Objetivos específicos

- Generar el estado del arte de los algoritmos utilizados en la planeación de redes inalámbricas que permitan identificar y determinar los requerimientos del algoritmo que sugieran la mejor estrategia de expansión de una red
- Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales
- Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple.
- Aplicar el algoritmo diseñado en la red libre de Bosachoque analizando los resultados obtenidos

1.3 Justificación

El acceso a Internet de banda ancha tiene impactos positivos en la sociedad, puesto que contribuye de manera significativa al crecimiento económico en muchos aspectos, ya que mejora la productividad, facilita la adopción de procesos de negocio eficientes, aumenta la innovación y mejora los procesos de funcionamiento en las empresas (ITU, 2012), por esta razón la Comisión de Ciencia y Tecnología para el

Desarrollo de las Naciones Unidas mediante su informe “El acceso de banda ancha a Internet como medio de lograr una sociedad digital inclusiva” véase en (ONU, 2011), sugiere a todas las naciones miembros de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) aumentar los esfuerzos de que todas las personas y comunidades tengan acceso a banda ancha. Sin embargo, la falta de accesibilidad a banda ancha en zonas rurales se debe a que los Proveedores de Servicios de Internet ISP, tienen que desplegar su infraestructura en lugares donde probablemente no retornaran su inversión, por esto, es importante planificar un óptimo despliegue o actualización de la red. En la actualidad, se encuentran toneladas de software para la planeación de redes, sin embargo, estas están enfocadas al planeamiento de redes de banda ancha de telefonía móvil (S-t Hilarie, 2008) y redes inalámbricas locales WLAN (Bosio, 2008), mientras que para la planificación de redes BWA en zonas rurales estos enfoques son limitados por la comunidad de investigación.

Nuestro enfoque está basado en las necesidades de guiar WISP en áreas rurales que se enfrentan con el único reto de extender su rendimiento con inversiones estrechas en un ambiente de ganancias limitadas. La clave para tales organizaciones es identificar la estrategia de despliegue más económica para planear su red mientras se toma en consideración su cobertura. Por esto, en el presente anteproyecto, se propone el diseño de un algoritmo de optimización, que permita identificar el camino de solución de menor costo, seguido del desarrollo de un software que permita mostrar visualmente las posibles acciones a seguir, para finalmente, implementar el presente software en la Red Libre de Bosachoque, en donde se evaluará los resultados.

1.3.1 Beneficios tecnológicos

Se dará a conocer una nueva perspectiva a las WISP en la planificación de redes BWA en zonas rurales, incentivando la conectividad y accesibilidad a la banda ancha, además de que tendrá accesibilidad a la herramienta, puesto que se tiene previsto el desarrollo de un software libre, el cual podrá ser propenso a actualizaciones o mejoras por parte de la comunidad tecnológica, además de que fomentará la posibilidad de generar otras herramientas de software para la solución de problemas de optimización y planeación de redes.

1.3.2 Beneficios institucionales

El desarrollo del proyecto permitirá al programa de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca a contar con una herramienta que permita el desarrollo económico de la comunidad rural del municipio (vereda de Bosachoque) y demás lugares donde esta herramienta se pueda implementar, además que permitirá mejorar el servicio como WISP, que presta la Universidad en la Red Libre de

Bosachoque. También permitirá el fortalecimiento del semillero de investigación Kinestasis, fomentando el desarrollo de herramientas tecnológicas al servicio de la sociedad.

1.3.3 Beneficio social

La herramienta permitirá sugerir las mejores decisiones al momento de planear una red o mejorar la cobertura de Internet de banda ancha, llevando consigo un desarrollo económico, puesto que la comunidad podrá tener a su disponibilidad un sin fin de herramientas que permitan generar un desarrollo económico en el entorno, además de fortalecer el sector rural y disminuir la brecha digital que existe en los países en desarrollo.

1.4 Alcances y limitaciones

1.4.1 Alcances

El presente proyecto tiene como objeto diseñar un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas que permita sugerir las mejores opciones para incrementar la cobertura de ancho de banda y acceso a internet en zonas rurales. Este algoritmo se implementará y evaluará en la red libre comunitaria de Bosachoque, se espera que sea una herramienta adecuada que permita la toma de decisiones al momento de planificar la expansión de la red, además se plantea la base para desarrollar futuros trabajos en el campo de las redes y las telecomunicaciones como puede ser el diseño de un software.

1.4.2 Limitaciones

El proyecto estará limitado por la infinidad de soluciones válidas para realizar la planeación incremental de una red ya que se pueden generar problemas de algoritmos como bucles infinitos, NP-hard, entre otros. En la evaluación se tiene limitaciones en cuanto a infraestructura disponible para desplegar torres nuevas, nodos nuevos, ampliación de nodos, y demás acciones sugeridas por la herramienta.

2 Capítulo 2. Marco referencial

2.1 Antecedentes

El acceso a Internet a través de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) se ha convertido en un instrumento fundamental de desarrollo social, económico, político y cultural para los gobiernos y sociedades en todo el mundo, lo que ha conllevado a un desarrollo digital.

El desarrollo digital hace referencia a aspectos como Infraestructuras que faciliten el acceso universal, geográfico y social a las tecnologías; sector TIC respecto a la industria tecnológica existente; competencias digitales o nivel de alfabetización digital en un tiempo determinado; marco legal y regulatorio referente a normatividad, políticas y estrategias de las TIC; contenidos y servicios que incluye la oferta de servicios digitales. (Rendón Gallón, 2011)

Aunque la era digital es un fenómeno mundial existente en países más desarrollados que otros, conlleva a la denominada brecha digital que es la ausencia de una o varias dimensiones contenidas en el desarrollo digital, es esta entonces un reto para la sociedad de la información.

Una alternativa para disminuir la brecha digital, son las redes Libres comunitarias (RLC), entendidas no solo como redes de computadores sino como redes comunitarias implementadas en poblaciones vulnerables donde el acceso a la información es una posibilidad y no una realidad (Gordillo, 2013).

Debido a que las redes comunitarias por lo general se encuentran desplegadas en áreas geográficamente separadas, se utilizan tecnologías inalámbricas como mesh y radioenlaces usando bandas libres como la de 2,4 GHz; Las tecnologías inalámbricas son ampliamente utilizadas en áreas rurales, ya que, por cuestiones de acceso e infraestructura, las tecnologías cableadas no resultan ser viables para estos casos, dando como solución las redes inalámbricas comunitarias (WCN) (flickenger. 2008). Además, en este tipo de redes, se emplean materiales que pueden ser adquiridos por la comunidad, y donde este autor muestra una guía detallada para realizar conexiones inalámbricas, que permitan conectar con un ancho de banda significativo lugares remotos y de difícil acceso, además de tener un enfoque orientado a países en desarrollo. En varias partes del mundo se pueden encontrar diferentes redes comunitarias, un ejemplo bastante significativo y de gran éxito es la red guifi.net, que comenzó en 2004 en la comarca de Osona (Catalunya), este es un proyecto tecnológico, social y económico, impulsado desde la ciudadanía que tiene por objetivo la creación de una red de telecomunicaciones abierta, libre y neutral, basada en un modelo de procomún (guifi.net). Guifi.net tiene a la fecha de diciembre de 2016, 32.500 nodos activos y se calcula que más de 50.000 personas reciben servicio de Internet gracias a esta red. Sin embargo, el éxito de esta red no

radica especialmente en la gran cobertura que ofrece y de cómo ha sido el impacto en los países en que se ha desarrollado, sino que según (Roger,2015), ha permitido mostrar la importancia de mantener la infraestructura de la red como bien colectivo ya que el principio subyacente detrás de guifi.net es la firme convicción de que la mejor manera de mantener una red es estableciéndola como un recurso colectivo común (CPR).

A pesar que gran parte de los nodo están conectados con tecnología WiFi en Guifi.net, también utiliza tecnología cableada y de fibra óptica, debido a que se desarrolló en gran parte en zonas urbanas, sin embargo como ya hemos mencionado, la WCN ha tenido gran participación en zonas rurales, en este enfoque se destaca una red inalámbrica mesh (WMN), desplegada por la universidad de Lancaster en Wray (Inglaterra), proporcionando servicio de Internet a una villa en un área aproximada de dos kilómetros por un periodo de tres años (Ishmael, 2008). Esto a pesar de haber tenido algunas limitaciones y complicaciones, muestra cómo se tuvo que reeducar a la gente para que se pueda hacer uso de la red de la mejor manera, dando como resultado la disponibilidad de banda ancha y mejorando la calidad de los servicios que se prestan.

En el ámbito local, en Bogotá se han desplegado diferentes redes inalámbricas comunitarias, las cuales valen la pena resaltar a pesar de no ser un entorno rural, estas muestran la forma de cómo se puede hacer inclusión social a sectores populares, en esta aparece (ciudad bolívar), una red desplegada desde la Universidad Francisco José de Caldas, la cual muestra desde el proceso de selección de puntos donde se desplegaron los nodos, hasta la evaluación de los resultados después de su despliegue; en esta investigación se logró ampliar la cobertura en más de 40% con el uso de antenas artesanales, utilizando guías y herramientas propuestas por (flickenger,2008) , demostrando, que la participación de la ciudadanía es fundamental para el éxito de estas redes.

2.1.1 Descripción de la red de Bosachoque Libre

La Red Bosachoque Libre es un macroproyecto misional de investigación de la Universidad de Cundinamarca de Facultad de Ingeniería (redes libres como alternativa de innovación social e inclusión digital en la vereda Bosachoque del municipio de Fusagasugá), con el fin de proveer servicio de Internet a la vereda Bosachoque utilizando conexiones inalámbricas, dado que, por ser una zona rural, una conexión cableada sería costosa y difícil. Esta red, se implementó con el fin de generar a la comunidad una herramienta que permita la conectividad, fomentando el desarrollo y crecimiento de esta, utilizando las tecnologías, protocolos y herramientas típicas de una red inalámbrica en países en desarrollo. El proceso de cómo se planeó esta red se encuentra documentado en (Mahecha, 2017).

La red de Bosachoque fue planeada e implementada como una red BWA (acceso inalámbrico de banda ancha “Broad Band Wireless Access”) de dos niveles, nivel de back-haul donde de manera inalámbrica se adquiere el servicio de internet y nivel de acceso donde se conectan los usuarios finales. El nivel back-haul hace referencia a los sitios de transmisión que están interconectados usando enlaces inalámbricos punto a punto de larga distancia (PTP), mientras que el nivel de acceso proporciona conectividad al equipo del cliente (CPE) a través de un enlace punto multipunto (PMP).

La universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá hace la función de proveedor de servicio de Internet (ISP) con el fin de desarrollar y ejecutar el macroproyecto mencionado.

Para el diseño, se especificó un DNS, este se tomó a partir del DNS asignado a la universidad de Cundinamarca, el cual es 200.14.41.2 y, como respaldo se utilizó el DNS de Google 8.8.8.8, además, la red cuenta con servicios de DHCP y firewall, cumpliendo con las especificaciones de enrutamiento y seguridad que una red de esta magnitud debe tener.

El dimensionamiento del número de usuarios se estableció según el POT (plan de ordenamiento territorial) 2014, cuyos datos reposan de manera oficial en la alcaldía de Fusagasugá, donde se consta que en esta población rural se encuentran un número aproximado de 4000 personas, por ende, el direccionamiento está diseñado para suplir de servicio de Internet a la comunidad a un total de 4000 Host.

En este nivel se utiliza un enrutador y una antena Access Point ubicada en la Universidad de Cundinamarca específicamente en el bloque F, donde por medio de un enlace punto a punto (PTP) y utilizando dos antenas RocketM5 AC a una frecuencia de trabajo entre 5.2 GHz 5.8 GHz , se direcciona a un punto ubicado en la vereda san José del chocho del municipio de Sylvania-Cundinamarca; Aquí se encuentra el nivel de acceso , donde un enlace multipunto con topología anillo se encarga de la distribución de la señal por medio de una antena sectorial Rocket Prism AC, a todas las subredes que se encuentra dentro de la vereda Bosachoque (Tobón).

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Brecha Digital

En el año 1995 eclosionan para la población dos tecnologías totalmente disruptivas, Internet y la telefonía móvil, ellas sugieren una nueva revolución, la llamada revolución digital, que a su vez crea la sociedad de la información (S.I), dando inicio al planteamiento sobre cómo medir y modelizar la S.I, el nivel de desarrollo digital y el impacto del desarrollo digital en el ser humano. De igual manera, el acceso a

Internet a través de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) ha tenido un auge exponencial en los últimos años, en efecto, este avance se presenta en países desarrollados o zonas metropolitanas de países en desarrollo (Sen and Raman (2007)), sin embargo, existen unas comunidades con poco o ningún acceso a las TIC (Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Fernandez (2011)) y otras con acceso casi universal a telefonía fija, móvil e Internet de banda ancha, es así que resulta el concepto de **brecha digital** entendiéndose como la ausencia de una o varias dimensiones contenidas en el desarrollo digital. En relación con lo anterior, las poblaciones sin acceso a las TIC poseen un bajo nivel socioeconómico, viven en zonas de difícil acceso con condiciones climatológicas desfavorables e incluso con ineficiencia o inexistencia de redes eléctricas, al mismo tiempo, las personas que viven en áreas rurales sufren el efecto de la brecha digital incluso más fuerte que los habitantes urbanos, debido a que no pueden acceder a servicios como el aprendizaje a distancia, la salud y el comercio electrónico (Bernardi (2012)).

2.2.2 Redes Libres Comunitarias

Una alternativa para disminuir la brecha digital, son las Redes Libres Comunitarias (RLC), entendidas no solo como redes de computadores sino como redes comunitarias implementadas en poblaciones vulnerables donde el acceso a la información es una posibilidad y no una realidad (Gordillo (2013)).

Una red libre comunitaria, es una red troncal, dividida en subconjuntos de redes construidas y gestionadas de manera colectiva por la comunidad, la cual se involucra en la red de forma activa y participativa.

2.2.2.1 Características de RLC

- Abiertas: porque todo el mundo tiene el derecho a conocer la forma en que se construyen.
- Libres: ya que el acceso a esta red está impulsado por un principio de no discriminación, por lo que son de acceso universal.
- Neutrales: porque cualquier solución técnica disponible se puede emplear para ampliar la red, y porque la red se puede utilizar para transmitir datos de cualquier tipo por cualquier participante, incluyendo también fines comerciales(guifi.net (2016)).

Debido a que las redes comunitarias por lo general se encuentran desplegadas en áreas geográficamente separadas, se utilizan tecnologías inalámbricas como mesh y radioenlaces usando bandas libres como la de 2,4 GHz; las tecnologías inalámbricas son ampliamente utilizadas en áreas rurales, ya que, por cuestiones de acceso e infraestructura, las tecnologías cableadas no resultan ser viables para estos casos,

dando como solución las redes inalámbricas comunitarias (WCN) en donde ya se han realizado trabajos importantes como se muestra en (Flickenger (2013)).

2.2.3 Planeación de Redes Inalámbricas

Una red inalámbrica es la interconexión de varios nodos entre sí mediante la transmisión y recepción de señales electromagnéticas sin ninguna guía, empleando como medio el aire o el espacio vacío. La planificación de redes supone la definición de requisitos para la creación de una infraestructura que permita conectar estos sistemas a través de una red (IBM (2019)), se debe agregar que, la planeación de redes inalámbricas es un área muy activa por la comunidad científica, sin embargo, el foco de las investigaciones son las redes de banda ancha móvil y redes de área local inalámbrica.

2.2.3.1 Factores clave de la planeación

A continuación, se detallan factores claves de la planeación de redes inalámbricas.

- Costos de despliegue: valor inicial de instalación de la red.
- Costos de implementación: coste del mantenimiento y funcionamiento de la red.
- Expansión de la red: crecimiento de la red, abarcando más territorio.
- Cobertura de la red: área geográfica que cubre la red.
- Capacidad de la red: ancho de banda requerido para la transferencia de datos.
- Retorno de la inversión: beneficio obtenido en relación a la inversión realizada.

2.2.4 Algoritmos utilizados en la planeación

Aunque existen estructuras de algoritmos para solucionar problemáticas en la planeación incremental de redes inalámbricas (R. Whitaker and Hurley 2003) proporcionan información acerca de los enfoques propuestos para el diseño de redes, que muestran la evolución de modelos y técnicas para la planificación automática de servicios inalámbricos celulares, cabe resaltar que la documentación existente hace énfasis en redes móviles, sin embargo, este concepto es aplicable para el despliegue de redes inalámbricas rurales. Dicho lo anterior, *Whitaker* facilita la descripción de diferentes clases de algoritmos que se pueden usar para realizar la planeación de redes inalámbricas.

- **Algoritmos voraces**

Es una estrategia de búsqueda por la cual se sigue una heurística consistente en elegir la opción óptima en cada paso local con la esperanza de llegar a una solución general óptima. El procedimiento central del algoritmo voraz apunta a asignar las mejores ubicaciones posibles a un conjunto dado de estaciones base activas.

- **Algoritmos genéticos (GA)**

Estos algoritmos imitan algunos de los procesos de evolución y selección natural al mantener una población de soluciones candidatas que están representadas por una cadena de genes (con frecuencia binarios). Con el tiempo, la población evoluciona a través de procesos que emulan procesos biológicos como la reproducción. Los miembros de la población se combinan para producir descendientes. El concepto básico es que los fuertes tienden a adaptarse y sobrevivir, mientras que los débiles tienden a desaparecer. En la planeación de redes se utiliza la optimización de varios objetivos, estos se conocen como optimización multiobjetivo, en la que existe más de una solución óptima con respecto a todos los objetivos, entre ellos lugar de instalación de una torre, configuración de una antena, altura, etc.

- **Búsqueda tabú (TS)**

La búsqueda tabú es un algoritmo heurístico de nivel superior para resolver problemas de optimización combinatoria. Es un procedimiento de mejora iterativo que comienza a partir de cualquier solución inicial y trata de determinar una mejor solución. TS (por sus siglas en inglés *tabu search*) se caracteriza por su capacidad para evitar el atrapamiento en la solución óptima local y para evitar los ciclos utiliza una memoria visible del historial de búsqueda. Normalmente, el algoritmo TS comienza sin conocer la solución correcta, dependiendo completamente de las respuestas del entorno que interactúa para llegar a la solución óptima (Abido (2002)). Este algoritmo permite encontrar una ubicación de las torres en la fase de planeación para lograr un óptimo rendimiento de la red.

2.2.5 Representación de la topología

Topología se refiere a la configuración de la red, es decir, a su forma de conectividad física en la que los dispositivos intercambian datos entre sí.

Para diseñar la infraestructura de la topología de la red requerida, es necesario describir la topología por medio del uso de grafos ya que es a través de esta estructura de datos que se elabora el procesamiento computacional del problema (Ríos Rivera and Rodríguez Mújica (2015))

2.2.5.1 Grafo

Un grafo en el ámbito de las ciencias de la computación es un tipo abstracto de datos (TAD), que consiste en un conjunto de nodos (también llamados vértices) y un conjunto de arcos (aristas) que establecen relaciones entre los nodos. Formalmente se representa mediante el par $G = (V, A)$, dónde:

- V es un conjunto de objetos llamados vértices o nodos.
- A es un conjunto de objetos denominados aristas o arcos.
- Las aristas representan relaciones entre los vértices, de forma que una arista es un par (u, v) de vértices de V .

2.2.5.1.1 Herramientas de manipulación de grafos

- **Python**

Python es un potente lenguaje de programación que permite representaciones simples y flexibles de redes, así como expresiones claras y concisas de algoritmos de red. Python tiene un ecosistema de paquetes vibrante y en crecimiento que NetworkX utiliza para proporcionar más funciones, como el álgebra lineal numérica y el dibujo (NetworkX (2019)).

- **NetworkX**

NetworkX es un paquete de Python para la creación, manipulación y estudio de la estructura, dinámica y funciones de redes complejas.

NetworkX proporciona:

- Herramientas para el estudio de la estructura y dinámica de redes sociales, biológicas y de infraestructura;
- Una interfaz de programación estándar e implementación de gráficos que es adecuada para muchas aplicaciones;
- Un entorno de rápido desarrollo para proyectos colaborativos, multidisciplinarios;
- Una interfaz para los algoritmos numéricos existentes y el código escrito en C, C++ y FORTRAN;
- La capacidad de trabajar con grandes conjuntos de datos no estándar.

NetworkX permite cargar y almacenar redes en formatos de datos estándar y no estándar, generar muchos tipos de redes aleatorias y clásicas, analizar la estructura de la red, construir modelos de red, diseñar nuevos algoritmos de red, dibujar redes entre otros. (NetworkX (2019)).

2.3 ESTADO DEL ARTE

2.3.1 Planeación de redes móviles UMTS

En (St-Hilaire (2008)), se presenta una literatura detallada de los problemas que se presentan en la planeación de la topología celular 3G, la cual está basada en el Sistema universal de telecomunicaciones móviles **UMTS** (“*Universal Mobile Telecommunications System*”); para entender las dificultades que se presentan en la planeación, es importante hacer una pequeña descripción de la arquitectura UMTS.

Una arquitectura típica de UMTS se muestra en la figura (1), donde se observa que una red UMTS está dividida en dos partes: la *red de acceso* y la *red de núcleo*. La primera, es también llamada red UMT de radio terrestre **UTRAN**, la cual está compuesta por muchos subsistemas de red de radio **RNS** (“*radio network subsystem*”). Cada RNS contiene un controlador de red de radio **RNC** (“*radio network controller*”) y una o más estaciones bases **BS** (“*base station*”).

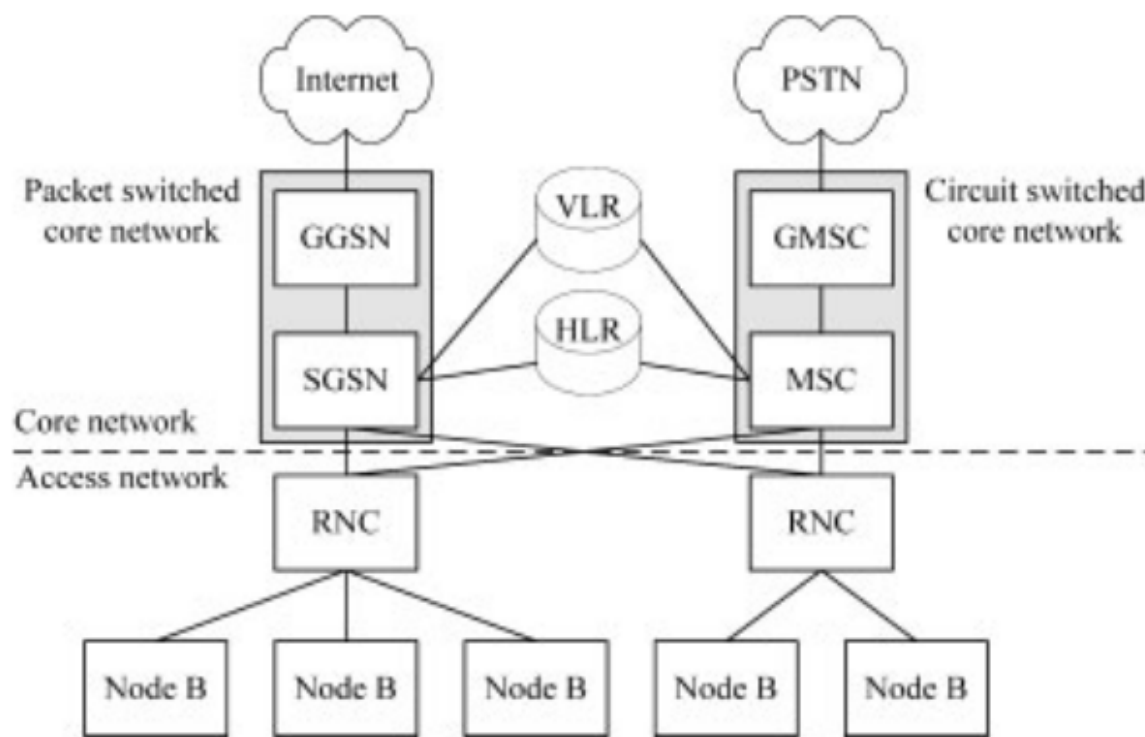


Figure 1: Estructura básica de una infraestructura UMTS. Tomado de St-Hilaire (2008)

Las estaciones bases (en este caso son los *nodos B*) son usados para transmitir/recibir radiofrecuencia hacia/desde los usuarios móviles, mientras que las RNC se ocupa de los recursos y la gestión de tráfico de datos. El principal objetivo de la UTRAN

(“*UMTS Terrestrial Radio Access Network*”) es hacer el enlace entre los usuarios móviles y el núcleo red.

2.3.1.1 Planeación de Celda

El autor *Hitlarie*, descompone la planeación de las redes móviles de manera modular, con el fin de reducir la complejidad y los divide en los siguientes subproblemas:

- Subproblemas de planeación de celdas.
- Subproblemas de planeación de red de acceso.
- Subproblemas de planeación de núcleo de red.

La parte de los subproblemas que se necesita abordar con más detalle, son los de planeación de celdas, ya que se asemeja más al enfoque que se necesita en la planeación de redes inalámbricas de banda ancha; a continuación, se describe dicho subproblema, así como algunos trabajos que se han realizado.

2.3.1.1.1 Subproblemas de planeación de celdas

El problema inicial de planeación es cubrir todos los usuarios móviles en un área determinada con el número mínimo de BSs. En la planeación de celdas se encarga de resolver los siguientes ítems:

- Optimizar el número de BSs.
- Mejor localización para instalar BSs.
- Escoger el tipo o modelo de BSs.
- Configuración (altura, orientación, potencia, etc).
- Asignación de usuarios móviles a la BS.

Los problemas de planeación pueden variar dependiendo en la planeación de red objetivo. Usualmente, en la planeación de red se requiere:

- Minimizar los costos de la red.
- Maximizar la calidad de la señal.
- Maximizar el área de cobertura.

Sin embargo, esto puede ser contradictorio, ya que, por ejemplo, si se quiere maximizar la cobertura se necesitarán desplegar más BSs y esto por supuesto, aumentara los costos. Al principio, la planeación de redes inalámbricas se realizaba teniendo en cuenta la predicción de la señal, sin embargo, en las redes UMTS, la planeación de radio no puede ser solo basado en la predicción de la señal, sino que se deben tener en cuenta la distribución de tráfico. En esta parte aparece gran cantidad

de literatura del autor Amaldi, en (Amaldi 2003), el autor contextualiza que en la planeación de radio en el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles GSM (“*Global System for Mobile communications*”) se realizaba en dos fases, la fase de planeación de cobertura donde se define la mejor localización de las BSs teniendo en cuenta los modelos de propagación y la fase de planeación de frecuencia, que define el número de canales para cada BS teniendo en cuenta la calidad de la señal de interferencia de radio SIR (“*Signal-to-Interference Ratio*”).

Sin embargo, teniendo en cuenta el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha W-CDMA (“*Wideband Code Division Multiple Access*”), esto ya no se puede realizar en estas dos fases, debido a que el ancho de banda es compartido por todas las conexiones activas y no por la frecuencia asignada, así como también el área de cobertura de cada BS es afectada por la cantidad de tráfico.

Para la planeación de celdas, se tiene en cuenta los parámetros de calidad de la SIR, en el cual se define una SIR mínima, el cual depende de la potencia recibida; Esta depende de la potencia transmitida y las atenuaciones de señal en la propagación, por ende la potencia transmitida se puede ajustar para minimizar la interferencia, aquí aparece un concepto importante, el cual es el control de potencia PC (“*power control*”), en donde se ajusta la potencia de transmisión para cumplir dos objetivos, la potencia objetivo recibida P_{tar} y la SIR objetivo SIR_{tar} . En este artículo Amaldi propone un modelo de programación matemática, que ayuda en la decisión de planear redes móviles, teniendo en cuenta la mejor localización y configuración de las BSs, teniendo en cuenta el modelo de propagación Hata, donde se ajusta el PC y este a su vez es probado con un algoritmo aleatorio voraz, el cual añade o remueve BSs de la topología; En este artículo se describe el rendimiento de esta solución dando resultados óptimos y también demuestra que este problema es un problema típico de NP-hard. Este trabajo se resalta por ser pionero en la planeación de celdas.

En la planeación de redes, a menudo se utiliza la optimización de varios objetivos, más conocido como optimización multiobjetivo, el cual es diferente de una optimización simple, puesto que aquí solo importa optimizar un parámetro, dando como resultado el mejor diseño o la mejor optimización, teniendo en cuenta un máximo o un mínimo global que dependerá del objetivo de la optimización (maximizar o minimizar), sin embargo en la optimización multiobjetivo, existe más de una solución óptima con respecto a todos los objetivos; aquí, el objetivo consiste en encontrar un óptimo de Pareto, el cual nos dice que una solución es óptima cuando no existe otra solución tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros.

Como se ha visto anteriormente, en la planeación se pueden abordar diferentes objetivos (lugar de instalación de BS, configuración, altura, potencia, etc.), sin embargo, al momento de planificar la red, atacar todos los problemas al tiempo es un problema complejo, por esto, se han venido implementando algoritmos multiobjetivo, generalmente para estos casos se han venido desarrollando algoritmos genéticos

AG, en el trabajo de (Raisanen and Whitaker (2005)), los autores recolectan cuatro estados del arte de algoritmos genéticos multiobjetivo, donde los ponen a prueba para planificar una red aumentando la cobertura teniendo en cuenta los costos y los comparan teniendo en cuenta su desempeño en ciertas pruebas sintetizadas; los autores toman como referencia los algoritmos: **SPEA2**, **NSGAI**, **PGSA** y **SEAMO**. A continuación, se hará una breve descripción de cada uno.

- **SPEA2** (*The Strength Pareto Evolutionary Algorithm version II*)

La población inicial es sometida a una función de adecuación (“Fitness Function”), donde se escoge el valor individual más apto o el más “*fit*” de la unión del archivo y la población hija. El valor de la función de adecuación está dado por la suma de dos partes: cuantas soluciones domina (“*raw fitness*”) y la *densidad estimada*, el cual es la proximidad de otras soluciones en el espacio objetivo. Cada generación n es guardada en el archivo, en donde es de nuevo aplicado el operador a la nueva generación; Este proceso se repite hasta terminar el proceso.

- **NSGA II**

El individuo más apto está determinado por la unión del archivo y la población hijo, determinado por mecanismos de clasificación compuesto de dos partes. La primera parte está compuesta al determinar la capa de soluciones que no son dominadas, es decir, las que están más cerca al frente de pareto. La segunda parte es una medida de dispersión, determinada por la distancia de hacinamiento crowding distance), el cual se escogerá el que tenga menor hacinamiento, puesto que esto significa que tendrá más población cubierta y la solución será más diversificada. Este proceso se repetirá n repeticiones, guardando el valor de los dos resultados y repitiendo lo mismo con las nuevas generaciones, hasta que el algoritmo finalice.

- **PESA** (*The Pareto Envelope-based Selection Algorithm*)

A diferencia de los dos algoritmos anteriores, el *PESA* no tiene un tamaño de archivo fijo y solo permite que las soluciones no dominadas sean miembros, por ende, es más limitado. Si el archivo excede el tamaño de n soluciones, un factor de compresión o factor *squeeze*, es calculado para todos los miembros del archivo. El factor de compresión es el total de miembros en una subregión en una cuadrícula (las que están en el espacio de búsqueda, dentro de la subregión). El factor de compresión más alto es el que tenga más vecinos locales en una solución. Los miembros aleatorios de la región de la cuadrícula con el factor de compresión más alto se eliminan hasta que se reduce el tamaño del archivo a n . Los operadores genéticos son aplicados en los miembros del archivo a una nueva población hijo. Este proceso se repite hasta la finalización.

- **SEAMO** (*Simple Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization*)

La principal diferencia entre SEAMO y otro algoritmo, es que este es de estado estable y solo mantiene una población (de un tamaño constante n). La principal

ventaja del algoritmo SEAMO es su simplicidad, el cual usa la disposición de todos los mecanismos de selección basado en fitness o rango. El avance de la búsqueda está definido por tres simples reglas:

- los padres solo son remplazados por su propia descendencia.
- Las poblaciones duplicadas son eliminadas.
- La descendencia solo puede reemplazar a los padres si es superior: elitismo.

Los operadores genéticos se aplican a cada padre para formar un nuevo hijo, que se considera para la sustitución en la población de padres según las tres reglas. Este proceso se repite hasta la terminación.

El aspecto clave de este marco es un decodificador que utiliza un orden de ubicaciones de sitios candidatos para construir una celda. En este trabajo se concluyó que los algoritmos son similares en sus resultados en términos reales, sin embargo, se encuentran algunas diferencias, el **NGSA-II** y **SPEA2**, tienen resultados similares en cuanto al rendimiento, el algoritmo **PESA** generalmente obtiene ligeramente una baja calidad en el conjunto de soluciones, pero en cuanto a la velocidad de convergencia y distribución de soluciones tiene el mejor desempeño. En cuanto a **SEAMO**, se destaca por su simplicidad, su elegancia conceptual, su fácil implementación y su velocidad de ejecución, pero su simplicidad impide tener calidad en cuanto a la distribución de las soluciones obtenidas y en el bajo rendimiento en los factores medidos en el desarrollo del test. Para finalizar el trabajo, los autores determinaron que el algoritmo **NSGA-II** tiene el mejor rendimiento, siendo el que mejor se podría implementar en la planeación de celdas ya que obtuvo los mejores resultados de calidad en las soluciones obtenidas.

2.3.2 Redes WiMAX

En la planeación de celda, se han realizado trabajos con la tecnología 802.16e o WiMax; el autor (Gordejuela-Sanchez, Juttner, and Zhang (2009)), presenta un marco de referencia de optimización multiobjetivo que resuelve uno de los principales problemas dentro del diseño inicial de redes de acceso móvil, el cual es encontrar el mejor sitio de instalación de BSs dentro de un conjunto de lugares posibles.

La forma en que le autor trabaja la planeación de la red, consiste en que primero se realiza una predicción de la señal; aquí se tiene en cuenta el tráfico de diferentes sitios candidatos posicionados aleatoriamente en diferentes áreas geográficas, en esta fase evidencia las densidades de tráfico entre áreas rurales y áreas urbanas. Una vez se ha definido este modelo de tráfico, para realizar las funciones de costos, el autor realiza una función de costos en la cual tiene en cuenta el punto de equilibrio entre los diferentes factores que se presentan en el diseño de una red, los cuales son:

- Área de cobertura.
- Interferencia.
- Rendimiento.
- Rentabilidad de la operación de la red.
- Equipamiento y otros costos.

La función de costos está dividida en dos partes, una consiste en una función que tiene en cuenta los parámetros técnicos de rendimiento que debe tener la red, como lo son penalizada con diferentes parámetros de requerimientos que debe tener la red como son ancho de banda para establecer videoconferencias, Voz IP, servicios en la red, etc. Calidad de servicios QoS que deben tener los usuarios, entre otros. La otra función de costos está contemplada por todos los parámetros de rentabilidad que debe tener la red, para que la solución sea adecuada para los proveedores de internet, en esta se tiene en cuenta la rentabilidad de la red menos los costos de funcionamiento.

Una vez calculado estas funciones de costos, el paso a seguir es realizar la optimización multiobjetivo de los parámetros anteriormente analizados, esto se hace mediante el marco de referencia, en donde se va realizando la simulación de la red con la herramienta de planeación *ForsK's Atoll*, donde posteriormente se va a realizar una técnica de optimización con el algoritmo búsqueda tabú, donde el autor, modifica el algoritmo para buscar la solución multiobjetivo, una vez realizado esto, se van graficando las soluciones, con el fin de mostrarlas en el óptimo de Pareto. Este procedimiento se realiza n veces, donde en cada iteración, se realiza la técnica de optimización y se hace el ajuste correspondiente a la solución, donde se vuelve a simular, esto hace hasta encontrar una solución óptima.

En el trabajo de *Gordejuela*, se realizó la implementación de este marco de referencia de optimización multiobjetivo, donde se tuvo en cuenta como criterio de planeación una cobertura basada en QoS, lograr reducir al mínimo la interferencia y los costos de ubicar un conjunto de 20 BSs, luego se muestran los resultados de 600 iteraciones y se demuestra que el marco de referencia ha contribuido a un mejor resultado con respecto a la solución sin planeación y que además tiene en cuenta factores económicos que se pueden ajustar según las necesidades del proveedor de la red, dando como resultado una herramienta de optimización flexible y ofreciendo en este caso una comprensión detallada de cómo se puede hacer la planeación óptima utilizando redes WiMax.

2.3.3 Redes BWA en zonas Rurales

Prestar servicios de banda ancha en zonas rurales requiere de sistemas de planeación dado que el acceso a estas zonas apartadas requiere inversión en infraestructura para desplegar la topología física de la red. Además, el desarrollo de las telecomunicaciones de banda ancha en zonas rurales se enfrenta a numerosos desafíos dentro del ecosistema de las telecomunicaciones de banda ancha, entre ellos se encuentran:

- Los gobiernos: Perspectiva política, jurídica y reglamentaria
- Los reguladores: Políticas para el despliegue de infraestructura en zonas distantes
- Los proveedores de servicios de telecomunicaciones: La inversión en telecomunicaciones rurales debe garantizar un negocio sostenible y viable
- Los fabricantes de equipos de cliente (CPE): Costo de los equipos
- Los consumidores: Costo elevado de los servicios, dificultad de acceso y disponibilidad, menor nivel de alfabetización tecnológica lo que imposibilita usar los servicios disponibles.

En la planeación de redes inalámbricas en áreas rurales, destacan los autores (Sen, Bernardi, Rios), cada uno de ellos propone una planeación de redes teniendo en cuenta su país de origen y priorizando las necesidades, requisitos y restricciones que se tienen en cada uno de ellos. En este artículo

Con el objetivo de reducir la brecha digital, autores (Bernardi 2012), (Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Fernandez 2011), (Sen 2006) han propuesto como solución la planeación y despliegue de redes de banda ancha inalámbrica en zonas rurales; considerando las condiciones locales, como la ubicación geográfica, el bienestar económico de la comunidad, el tipo de entorno rural o urbano y el relieve del terreno, puede identificarse un conjunto de posibles soluciones para prestar accesos de banda ancha, y que van, entre otros, desde sistemas de cable a sistemas inalámbricos fijos, sistemas satelitales o de enlaces de microondas, sistemas ADSL y tecnologías móviles. A su vez, se destacan algunos trabajos de planeación de redes BWA, los cuales se desarrollan en países con marcadas diferencias de índices de desarrollo humano y el porcentaje de población que vive en áreas rurales; se habla entonces de Reino Unido, un país desarrollado donde el 17% de la población vive en área rurales y la India, un país en vía de desarrollo, donde el 66% de la población vive en áreas rurales.

2.3.3.1 Redes BWA en la India (País rural)

- Ubicación de la red:

El autor *Sen* se enfoca específicamente en la planeación de redes de banda ancha en áreas rurales, en su tesis (Sen 2006) trabaja sobre una red desplegada en el distrito de Andhra del Oeste de Godavari Pradesh ubicado en la India.

- Población a quién va dirigido:

La India es un país donde la mayoría de la población vive en áreas rurales (66% según el Banco Mundial) y esta hace parte de la brecha digital, esto se resuelve dando conectividad a todas las aldeas y pueblos. Lograr esto expandiendo la red actual de telefonía fija en zonas rurales no es factible teniendo en cuenta los costos elevados de la instalación de la infraestructura inicial, sin embargo, este caso no ocurre en la telefonía móvil, donde la demanda de usuarios es más densa y por ende se considera un modelo de negocio, puesto que se retribuye la inversión teniendo en cuenta la cantidad de usuarios dispuestos a pagar por este servicio.

- Problemática:

El problema radica en el hecho de que las zonas rurales tienen baja densidad de usuarios y grandes distancias entre grupos de usuarios, esto conlleva a que compañías de telecomunicaciones o proveedores de Internet (ISP) vean poco atractiva la inversión en estos lugares debido al costo inicial de infraestructura y despliegue de la red y bajo retorno de su inversión.

- Causas:
 - Costo elevado de la expansión de la red telefónica fija
 - No es un modelo de negocio debido al bajo retorno de la inversión
 - Baja densidad de usuarios
 - Costo de infraestructura
- Solución:

Por consiguiente, el autor propone la planeación de la topología de una red inalámbrica con el uso de la tecnología 802.11, puesto que permite una buena solución teniendo en cuenta su gran aceptabilidad, principalmente por su bajo costo. Por ende, esta tecnología se ha presentado como una opción de económica y efectiva para cubrir largas distancias, ya que permite que zonas muy amplias puedan conectarse a un nodo de línea terrestre con conectividad a Internet de forma cableada (como fibra óptica) por medio de enlaces inalámbricos. Cada enlace inalámbrico corresponde a una antena en una torre instalada en cada pueblo, los cuales deben tener línea de vista *L.O.S. (Line Of Sight)*.

Para la formulación en la construcción de una topología que permita el desempeño de la red, se estipulan de tres principales restricciones:

1. Restricción de rendimiento: Capacidad de carga y descarga por cada nodo o

pueblo que en el caso de la red en que se realizó el trabajo, se establecido que en cada nodo se tuviera un ancho de banda mínimo de 384 Kps .

2. Restricción de Potencia: Se refiere al límite superior de la Potencia Isotrópica Irradiado (PIRE) en cada transmisor y el límite inferior de potencia recibida en el receptor (sensibilidad del receptor).
3. Restricción de interferencia: La señal recibida debe ser mayor al umbral de interferencia.

El problema de la planeación es resuelto teniendo en cuenta una serie de dependencias, los cuales están mostradas en la *figura 2*. A continuación se explicarán cada una de estas dependencias:

La tasa de transferencia de datos depende de la MAC

El rendimiento requerido se logra dependiendo del protocolo MAC que se esté implementando, en este caso, el autor propone utilizar el protocolo de capa de Enlace de Datos 2P, puesto que en comparación con los protocolos más utilizados como TDMA y CSMA/CA, este tiene una capacidad de datos más elevada.

La velocidad de transmisión depende del diseño físico de la red

El rendimiento depende del tipo de enlace, Punto a Punto (PTP) ó Punto Multipunto (PMP), puesto que si es PTP se usa todo el rendimiento permitido por la MAC, en cambio si es PMP el rendimiento permitido por la MAC se divide entre los enlaces que están conectados, de esta manera el protocolo de enlace de todos tendrá que conmutar entre los enlaces existentes reduciendo el rendimiento del protocolo MAC.

La potencia de transmisión depende del tamaño del enlace

La señal transmitida tendrá una degradación en su intensidad, dependiendo de la distancia del enlace. Cada antena tiene una ganancia específica el cual es la relación de densidad de energía que radia en una dirección específica.

La MAC depende de la potencia de transmisión

Esto es específicamente para el protocolo MAC 2P, en el que múltiples enlaces pueden operar simultáneamente. La operación simultánea de múltiples enlaces requiere que se asegure que la relación de potencias de la señal real y de la interferencia (SIR) sea mayor que un margen especificado por el sistema.

La Altura de la torre depende del tamaño del enlace

La formación de un enlace Wifi entre dos nodos distanciados está basada en L.O.S. el cual debe tener despejado el 60% de la curvatura de la zona de Fresnel. El tamaño de la zona de Fresnel dependerá de la distancia del enlace.

Los costos de despliegue dependen de la altura de las torres

Los costos de despliegue dependen principalmente del tamaño de la torre que se van a implementar. Los costos de la torre crecen linealmente con la altura de la torre, así que en este punto se debe considerar que se debe diseñar la topología de tal forma que la altura sea la mínima, esto ahorrará los costos principales del despliegue de una red.

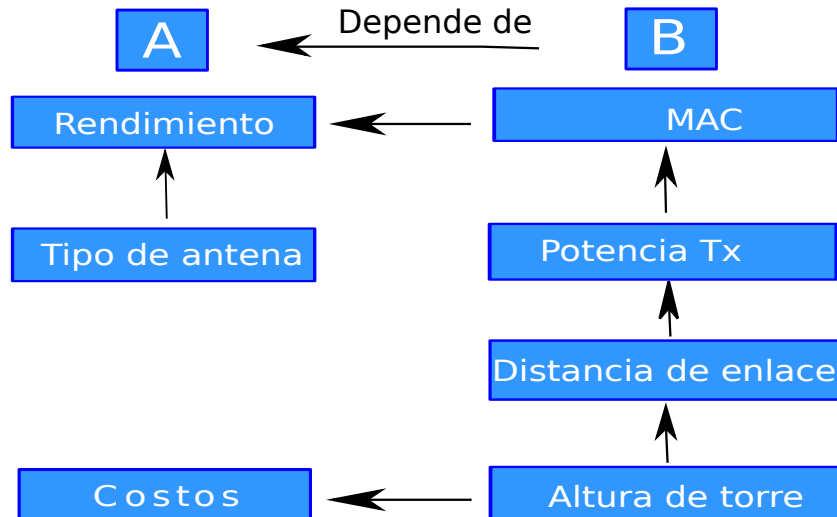


Figure 2: Dependencias de requerimientos

2.3.3.1.1 Consideraciones de diseño y enfoque de solución

Una vez se ha visto como se divide el problema, el autor sugiere resolver las dependencias con los siguientes pasos, el cual van a ser explicados:

- Topología de Búsqueda (TS):

Explorar el espacio de búsqueda para encontrar la topología de la red, se hace uso del algoritmo Branch-and-bound (Algoritmo de ramificación y límite), con ello se construye la topología de árbol, el cual va a dar una topología inicial de la red.

- Asignación de altura (HA):

Consiste en la altura óptima de las torres en las ubicaciones dadas una vez que se ha formado la topología, para ello se utiliza un conjunto de ecuaciones de programación lineal (LP), el cual se va a obtener la altura que sea optima.

- Asignación de Antena (AA):

Asignación apropiada de las antenas y sus respectivas orientaciones, se desarrolla un algoritmo heurístico de tiempo complejo polinómico.

- Asignación de Potencias (PA):

Proporcionar las potencias de transmisión en los radios del sistema usando LP.

- Aporte final:

Como aporte Sen entrega un algoritmo de planeación de redes en zonas rurales y, una vez implementado, el autor en los resultados concluye que se ahorró 22% con respecto a una planeación sin ninguna técnica de optimización.

2.3.3.2 Redes BWA en Gran Bretaña (País del primer mundo)

- Ubicación de la red:

Bernardi diseñó e implemento **Tegola** un banco de pruebas que proporciona internet a algunas comunidades remotas de Gran Bretaña, esta red ha funcionado desde el año 2008 y ha comunicado a 20 comunidades en toda Escocia.

- Población a quién va dirigido:

Gran Bretaña es un país desarrollado, comunmente llamado “país del primer mundo” ya que su población en su mayoría vive en zonas urbanas, sin embargo, el proyecto se enfoca en comunicar zonas rurales o apartadas que no cuentan con acceso a internet de banda ancha (16,9% del total de la población).

- Problemática:

La falta de herramientas de software para el diseño, gestión y evaluación de redes de acceso inalámbrico de banda ancha han obstaculizado su implementación generalizada a pesar de sus costos y ventajas operativas sobre otras tecnologías de Acceso de banda ancha.

- Causas:
- Costo de despliegue de ADSL
- Bajo retorno de la inversión
- Los usuarios viven lejos unos de otros
- Costo de los equipos
- No se puede acceder a software para comunicar pequeñas comunidades y pequeños WISP

Según *Bernardi*, en las últimas décadas se ha incrementado la conectividad de banda ancha, siendo la ADSL (del inglés Asymmetric digital subscriber line) con más del 60% de las conexiones de banda ancha en países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos es un organismo de cooperación internacional (OCDE); esto se debe principalmente al éxito de la capitalización de ADSL

debido al éxito de la red de telefonía. Esta tecnología se caracteriza por que la tasa de transmisión máxima que puede alcanzar esta en función de la distancia entre el usuario y la central telefónica, es decir, entre más larga sea la distancia, la velocidad de transmisión es más lenta, por esta razón es comúnmente más utilizada en áreas metropolitanas debido a que tiene más suscriptores y sea más efectivo retornar la inversión de despliegue de una infraestructura. Esto es la principal causa de la brecha digital que existe entre las áreas rurales y metropolitanas.

Pero *Bernardi* expone el despliegue de una red Rural de Banda Ancha (BWA) argumentando que la planeación ad-hoc no es una alternativa de diseño eficiente para este tipo de redes, sin embargo, refiere que la industria ofrece software para planeamiento de redes inalámbricas pero estos no están disponibles ni son adecuados para comunicar pequeñas comunidades y pequeños proveedores de servicio de Internet inalámbrico (WISP) ; cabe resaltar que las BWA usan un modelo de dos niveles, consistiendo en radioenlace Punto Multipunto (PMP) y Punto a Punto (PTP), el primero enlazando la Antena de la torre a los diferentes clientes y el segundo correspondiente al Backhaul.

- Solución :

El Internet satelital se podría decir que es una alternativa de conexión, puesto que está disponible prácticamente en cualquier parte y es frecuentemente subsidiada en áreas remotas incomunicadas, sin embargo, también tiene latencia de tiempo de ida y vuelta muy altos, lo cual lo hace inadecuado para aplicaciones que consuman un ancho de banda considerable, como es el caso de una videollamada (skape).

A través del planeamiento de red incremental *Bernardi* desarrolla un software denominado IncrEase cuyo enfoque es identificar la estrategia de despliegue más económica para planear la red teniendo en cuenta que los CPE (customer Premises Equipment) son la opción más rentable para llegar a la población en zonas rurales.

Los proveedores de servicio de Internet inalámbrico implementan una metodología de diseño para operar en escenarios rurales obteniendo remuneración de su inversión, este consiste en planificar su crecimiento ampliando su cobertura, tomando variables como:

- Limitar el alcance geográfico de los WISP: Para reducir los costos de operación.
- Infraestructura de la red: En áreas rurales la fibra para el Backhaul no está disponible, por ello los WISP deben desplegar su propio Backhaul inalámbrico, aumentando los costos.
- Cobertura de la red: El despliegue rural está basado en la cobertura más no en la capacidad.
- Presupuesto ajustado: Los proveedores de Internet buscan obtener un retorno de su inversión desde su etapa de despliegue ya que las zonas rurales son

entornos de baja rentabilidad.

- Clientes agrupados: Proporcionar acceso a la red en sectores dónde haya más densidad de la población, para así captar más usuarios.

Bernardi desarrolla un paquete de software con especial énfasis en las regiones rurales y en desarrollo. Se resalta que abordó tres desafíos técnicos en el contexto de redes de acceso inalámbrico de banda ancha:

- Mapeo de Banda Ancha
- Planeación de redes
- Administración de redes
- Aporte

La contribución de *Bernardi* es potenciar el negocio de los pequeños proveedores de Internet inalámbrico (WISP) en zonas rurales a través de un sistema de software, haciéndolo más eficiente reduciendo la brecha digital, a través de la herramienta IncrEase.

Se desarrolla un software de código abierto IncrEase implementado como una aplicación de escritorio multiplataforma en Java. IncrEase esta basado en un GIS de software libre de la NASA World Wind Java y en una base de datos gráfica Neo4J.

Para la implementación de IncrEase se toman tres fuentes:

- Demanda de la cobertura: Posibles usuarios de zonas rurales que no tienen acceso al servicio
- Usuarios que fallaron en la etapa de instalación: Cobertura insuficiente
- Reporte mesas de ayuda: Localización de los usuarios existentes

Además se obtienen otros datos de factores influyentes como la disponibilidad DSL, la cobertura de red 3G y datos demográficos. IncrEase a través de datos en forma de arreglo bidimensional cubre regiones de interés y con ello obtiene mapas de calor (áreas de mayor beneficio por la actualización de la red). En estos mapas a mayor calor menor es la cobertura, una posible solución es la instalación de una torre a partir de una lista de torres disponibles en esa área.

- **Modo de operación herramienta IncrEase**

Flujo de información de la herramienta

- IncrEase Targeted: En este modo de operación el operador selecciona una región específica de cobertura, como parte de expansión de la red
- Búsqueda Estratégica: Dónde la herramienta guía al operador para decidir el orden de despliegue de sitios de transmisión en el horizonte de corto o largo plazo basado en la rentabilidad esperada

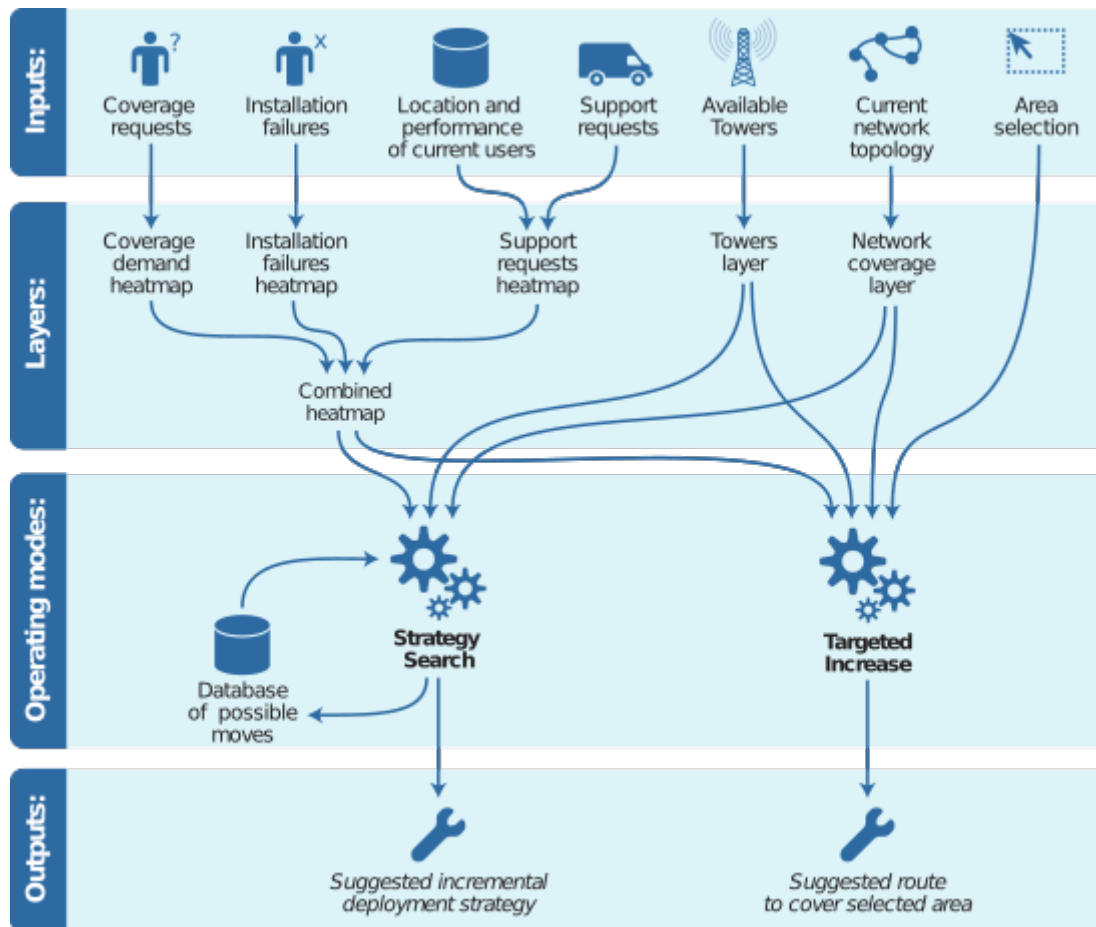


Figure 3: Ejemplo de flujo de informacion en la herramienta IncrEase

2.3.3.3 Redes BWA en la región del Sumapaz (Colombia)

- ubicación de la red:

A nivel local, (Ríos Rivera and Rodríguez Mújica 2015) propone una solución de construcción de topología en redes rurales dentro de la realización Del Estudio De Factibilidad, Socialización Y Capacitación, Para Implementación De Infraestructuras De Voz Ip Y Comunicaciones Convergentes En La Región Del Sumapaz ", del grupo de investigación GIGATT de la universidad de Cundinamarca.

- Población a quién va dirigido

La región del Sumapaz es una de las quince provincias del Departamento de Cundinamarca (Colombia), en ella se encuentra el páramo del Sumapaz, el páramo más grande del mundo. Consta de 10 municipios con un 41% de población rural del total de la población referente al año 2011, el énfasis del proyecto se plantea en la interconexión de estas zonas apartadas.

- Problemática

Las adversas condiciones económicas y de acceso a las tecnologías de la información, hacen que este proyecto busque evaluar la viabilidad y conseguir alternativas asequibles de diseño e implementación de redes, en este aspecto este trabajo pretende reducir los principales costos involucrados en la implementación física de redes de comunicaciones rurales

- Causas
- Costos de las torres
- Baja densidad de la población
- Bajo poder económico
- Costos de infraestructura y equipos
- Solución

En el informe técnico “ Realización del estudio de factibilidad, Socialización y Capacitación, para Implementación de Infraestructuras de Voz Ip y Comisiones Convergentes en la Región del Sumapaz” se plantea la posibilidad de brindar acceso eficiente por medio de voz y video llamadas a las zonas rurales de la región del Sumapaz, ofreciendo cobertura a todas las localidades incluyendo las más vulnerables con una calidad en el servicio coherente con el tipo de aplicación y con tarifas acordes a la población, y paralelamente llevando a ellos servicios de comunicaciones convergentes, haciendo de este un proyecto autosostenible que coadyuve a la reducción de la brecha digital y permita el aprovechamiento de los beneficios del programa de Mintic Vive Digital.

Hay que mencionar además que Ríos participó de forma activa en este proyecto en el que la construcción de redes de comunicación rural presenta particulares desafíos sobre todo en el costo que conlleva establecerlas. Además refiere que 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, debido a que este costo domina otros costos de infraestructura como el atribuido a los equipos de comunicación de el estandar IEEE 802.11 (WiFi), entonces el problema principal se convierte en mantener costos mínimos en la construcción de las torres de soporte para las antenas en cada nodo.

Ríos establece algunos factores principales en la planeación de la construcción de la topología y son:

- **Requerimientos de conectividad:** Primero, es importante asegurar que la topología planteada permita la conexión de la totalidad de la red
- **Limitaciones físicas:** Existen dos limitaciones físicas para la altura de las torres. Por ejemplo, existe una altura demasiado alta que representa un umbral para el cual los costos son prohibitivos y una altura mínima que limita el uso de torres tubulares
- **Naturaleza de la función de costos:** 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.
- **Condiciones sobre las alturas de las torres para establecer un enlace directo:** Para ello se debe garantizar que la potencia de transmisión sea suficiente para superar las pérdidas por espacio libre en toda la distancia del enlace. También, se busca mantener la línea de vista despejada de toda obstrucción.

Dentro de este contexto y al igual que Sen, Bernardi, Maserati, expone que el principal desafío es el costo que conlleva establecer redes en zonas rurales, haciendo especial énfasis en el costo de construcción de las torres que soportan las antenas, debido a que es el costo más grande en comparación con los atribuidos a los equipos de comunicación. Presenta los siguientes referentes:

2.3.3.3.1 Topología

Establece que las redes rurales mantienen una topología fija y se realizan enlaces de larga distancia, sin embargo, al ser áreas campestres existe una mayor cantidad de obstrucciones y acorde la topografía varía la altura de los obstáculos.

2.3.3.3.2 Costo de las torres

Para lograr obtener línea de vista entre los diferentes nodos es necesario que las torres tengan una altura suficiente para superar los obstáculos presentados en el terreno. Para la construcción de estas torres establece dos tipos de materiales:

- Mástiles
- Torres de acero ventadas

El costo de las torres, es proporcional a su altura y está relacionado con material de construcción, por ejemplo para un enlace de entre 7-8 Km (distancias típicas) se necesitarían torres de entre 30 m y 45 m con costos de entre 25 y 38 millones de pesos colombianos. Este costo es de varios órdenes de magnitud mayor que el de los equipos de comunicaciones, de manera que el principal problema de construcción de redes rurales radica en lograr una topología con el menor costo total de las torres que soportan las antenas.

- Aporte

Para resolver el problema de la planeación el autor desarrolla un algoritmo basado en (Panigrahi), donde la solución resulta de dos algoritmos TC-ALGO(G,c) y START-TC-ALGO(G,c), el primero determina el valor de altura óptimo que permite obtener el mejor enlace dentro de un grupo de enlaces vecinos a un nodo principal y el segundo permite recorrer el grafo y ubicar el menor enlace o conjunto de enlaces que representan el menor costo beneficio

3 Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1 Generar el estado del arte de los algoritmos utilizados en la planeación de redes inalámbricas que permitan identificar y determinar los requerimientos del algoritmo que sugieran la mejor estrategia de expansión de una red

En esta fase se indaga sobre las herramientas de planeación de redes inalámbricas existentes con el propósito de recopilar información para analizar y seleccionar la que más se adapte a la planeación de redes inalámbricas de banda ancha en zonas rurales, en esta primera etapa se realizan las siguientes actividades:

3.1.1 Recolectar información de planeación incremental de redes inalámbricas

Este recurso se utiliza para registrar información relacionada con la planeación de redes inalámbricas, se usó la técnica de recopilación documental consultando

libros, artículos de investigación en su mayoría de la revista de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), tesis, informes y demás documentos que contribuyeran a proporcionar datos enfocados en la temática central del proyecto. Lo que permitió obtener un bajo costo considerando la gran cantidad de información que se obtuvo, la bibliografía consultada es de característica técnica lo que permitió lograr una dimensión histórica, social y tecnológica a través del tiempo.

3.1.2 Analizar la información recopilada de redes inalámbricas enfocada a zonas rurales

Una vez se ha captado la información de planeación de redes se procede a realizar su respectivo análisis, tabulando todos los documentos encontrados, haciendo un rastreo y clasificación de los documentos, detallando:

Table 1: Ficha bibliográfica para seleccionar los archivos de estudio.

Tipo de documento
Título
Año
URI
Temática central
Estado del arte y marco conceptual reseñado
Metodología
Resultados

De este análisis de fuentes se encuentra que quince (15) son artículos de investigación, cinco (5) son tesis y dos (2) son libros. De los cuales se delimitan los temas a contextualizar, obteniendo los siguientes:

- Brecha Digital
- Redes Libres Comunitarias
- Planeación de Redes Inalámbricas
- Algoritmos utilizados en la planeación
- Representación de la topología
- Herramientas de manipulación de grafos
- Planeación de redes móviles UMTS
- Redes BWA en zonas rurales

Con ello se pudo establecer que los primeros seis puntos harían parte del marco teórico y los dos siguientes pertenecerían al estado del arte, esto como resultado de que el enfoque de esta investigación está relacionado con la planeación de redes móviles y BWA en zonas rurales.

3.1.3 Determinar la información que cumpla con los requerimientos necesarios para diseñar el algoritmo

Acorde al análisis ejecutado en la actividad anterior se encontró que los autores Bernardi, Sen y Milton proporcionan la información necesaria para diseñar el algoritmo. Dentro de los requerimientos proporcionados se tienen:

- Topología de la red actual
- Número de torres disponibles
- Cobertura de la red, hace alusión al alcance geográfico
- Altura de las torres
- Zona de fresnel
- Costo de despliegue de la red
- Costo de la infraestructura y de los equipos
- Algunos datos demográficos y económicos de la población

3.1.4 Documentar el estado del arte

Con toda la información analizada y los parámetros claros se documenta el estado del arte realizando una comparación entre los tres autores destacados mencionados con anterioridad. De ellos se establece

- Sen plantea su algoritmo en planear la red inalámbrica en zonas rurales de la India, se sabe que su contexto es netamente social y rural
- Bernardi desarrollo su software basado en Tegola, una red existente en Escocia, ampliando su cobertura a zonas rurales considerando el nivel lucrativo de la red enfocado en pequeños proveedores de internet
- Milton por su parte, propone el algoritmo en la región del Sumapaz- Cundinamarca (Colombia) enfocando su idea en la interconexión de escuelas rurales añadiendo el costo de la construcción de la topología de la red.

En contexto, el estado del arte se puede estudiar en el capítulo 2 de este Libro.

3.2 Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales

Partiendo del análisis e información recolectada se determinan los parámetros necesarios para continuar con la etapa de diseño del algoritmo para planear el crecimiento de una red inalámbrica en zonas rurales.

Para el desarrollo del algoritmo que permite la creación de una herramienta de planeación incremental de redes inalámbricas rurales, se plantea el modelo cascada que en el desarrollo de software es un proceso en el que todas las fases se realizan de forma secuencial, siguiendo un flujo de ejecución de arriba hacia abajo como una cascada. Esto permite hacer un fácil seguimiento del desarrollo del proyecto, realizando una distribución de tareas y delimitando sus fases.

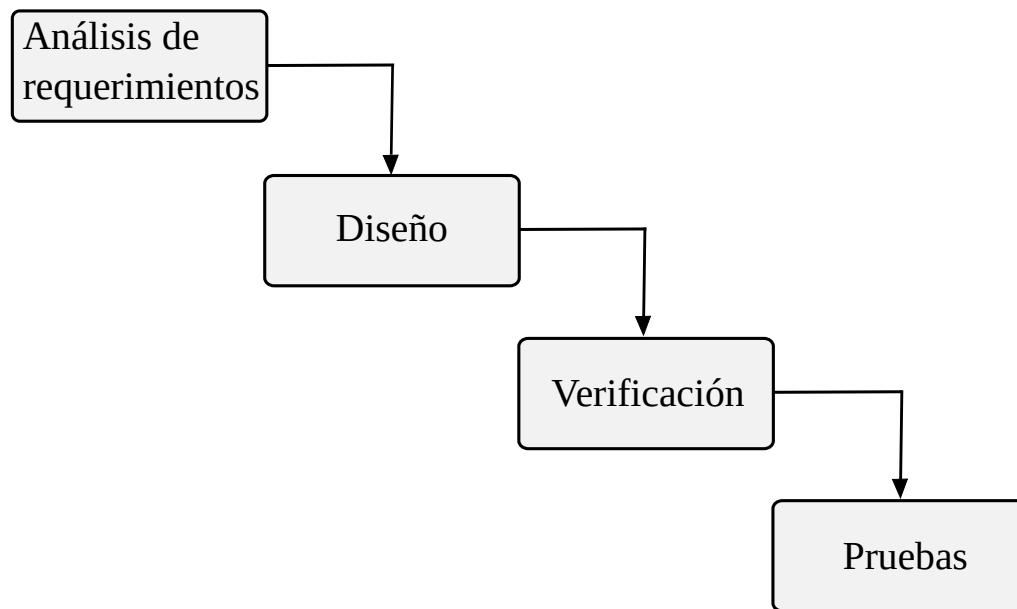


Figure 4: Estructura metodología cascada

3.2.1 Definir los datos de entrada y salida del algoritmo

Este ítem hace énfasis en la primera etapa de la metodología, (análisis de requerimientos), a partir de ella y conforme a la investigación documental realizada se determina que los tres autores en mención tienen similitudes en sus algoritmos, sin embargo, se comparan los tres algoritmos verificando sus datos de entrada y salida, entonces se tiene que:

- **Algoritmo planteado por Sen**

Table 2: Datos de entrada del algoritmo planteado por Sen.

Datos de entrada
Enumeración de todos los árboles y para cada árbol (coordenadas de la ubicación de las villas)
Asignación de las antenas
Asignación de los valores de potencia de las antenas
Asignación de las alturas de las torres en todos los nodos

Table 3: Datos de salida del algoritmo propuesto por Sen.

Datos de Salida
Topología de la red
Costo del árbol generado en comparación con otro anteriormente generado, de lo dos se guarda el de menor costo

- **Algoritmo diseñado por Bernardi**

Table 4: Parámetros de entrada del algoritmo de Bernardi.

Datos de entrada
Demanda de cobertura
Instalaciones fallidas
Ubicación y desempeño de los usuarios actuales
Solicitud de soporte
Torres disponibles
Topología de red actual
Área de selección

Table 5: Datos de Salida del algoritmo de bernardi.

Datos de salida
Estrategia incremental de despliegue sugerido
Ruta sugerida para cubrir el área seleccionada

Cabe resaltar que este paquete de software proporciona dos modos de operación

que se han mencionado con anterioridad:

- Búsqueda estratégica: Cuya salida es la primer fila de la tabla anterior
- Targeted Increase: donde se sugiere una ruta al área seleccionada
- **Algoritmo implementado por Rios**

Esta aplicación esta basada en Panigrahi, dónde resulta la solución en dos algoritmos, el primero TC-ALGO(G,c) y el segundo START-TC-ALGO(G,c).

Table 6: Parametros de entrada y salida del primer algoritmo de la aplicación, TC-ALGO (G,c)

Datos de entrada TC-Algo(G,c)	Datos de Salida TC-ALGO(G,c)
Grafo $G(V,E)$	Función de alturas h
Función de costos	

Table 7: Datos de entrada y salida del segundo algoritmo START-TC-ALGO (G,c).

Datos de entrada START-TC-ALGO (G,c)	Datos de salida START-TC-ALGO (G,c)
Grafo $G(V,E)$	relación costo beneficio r' best
Función de alturas h	incremento de altura $incr$
Nodo n	
Incremento altura <i>variación</i> en v	

Ahora, con los tipos de datos de entrada y salida de los algoritmos estudiados, se determinan los parámetros de entrada y salida del algoritmo que se va a diseñar. Es decir que el algoritmo se va a proponer surge de la combinación de los algoritmos vistos con anterioridad.

- **Algoritmo propuesto (Datos de entrada y salida)**

Table 8: Parámetros de entrada algoritmo propuesto

Datos de entrada
Grafo (Conexión de la totalidad de la red)
Asignación de antenas
Función de costos
TC-ALGO
START-TC-ALGO
Limitar el alcance geográfico

Datos de entrada
Red Backhaul disponible
Solicitudes de Cobertura
Clientes agrupados

Table 9: Salida del algoritmo

Datos de salida
Mejor topología de expansión de la red con el menor costo

3.2.2 Proponer el conjunto de operaciones secuenciales para la realización del Algoritmo

Esta es la segunda fase de la metodología (Diseño), en esta se muestra el proceso a ejecutarse para realizar el algoritmo.

A partir de los tres algoritmos estudiados se plantea una nueva propuesta para el planeamiento de redes inalámbricas en zonas rurales. Para esto, se toman las características más relevantes de cada uno de ellos y se combinan con el fin de generar un nuevo algoritmo que permita conectividad a internet en zonas apartadas a un bajo costo.

Proponer un nuevo algoritmo mezclando las mejores características de Sen, Bernardi y Rios plantea el proceso en cuatro pasos diferentes:

1. Declarar los datos de entrada
2. Generar los mapas de calor
3. IncrEase
4. Salida: Obtener una respuesta de planeación de redes inalámbricas rurales económica

En la siguiente figura se establece el diagrama sistémico del modo de operación de la herramienta propuesta.

Descripción del proceso de operación del algoritmo propuesto

1. Declarar los dato de entrada:

- Grafo, conexión de toda la red: se ingresa un grafo con una topología propuesta dónde todos los nodos se encuentren conectados entre sí.
- Algoritmo TC-ALGO: determina el valor de altura óptimo que permite obtener el mejor enlace dentro de un grupo de enlaces vecinos a un nodo principal;

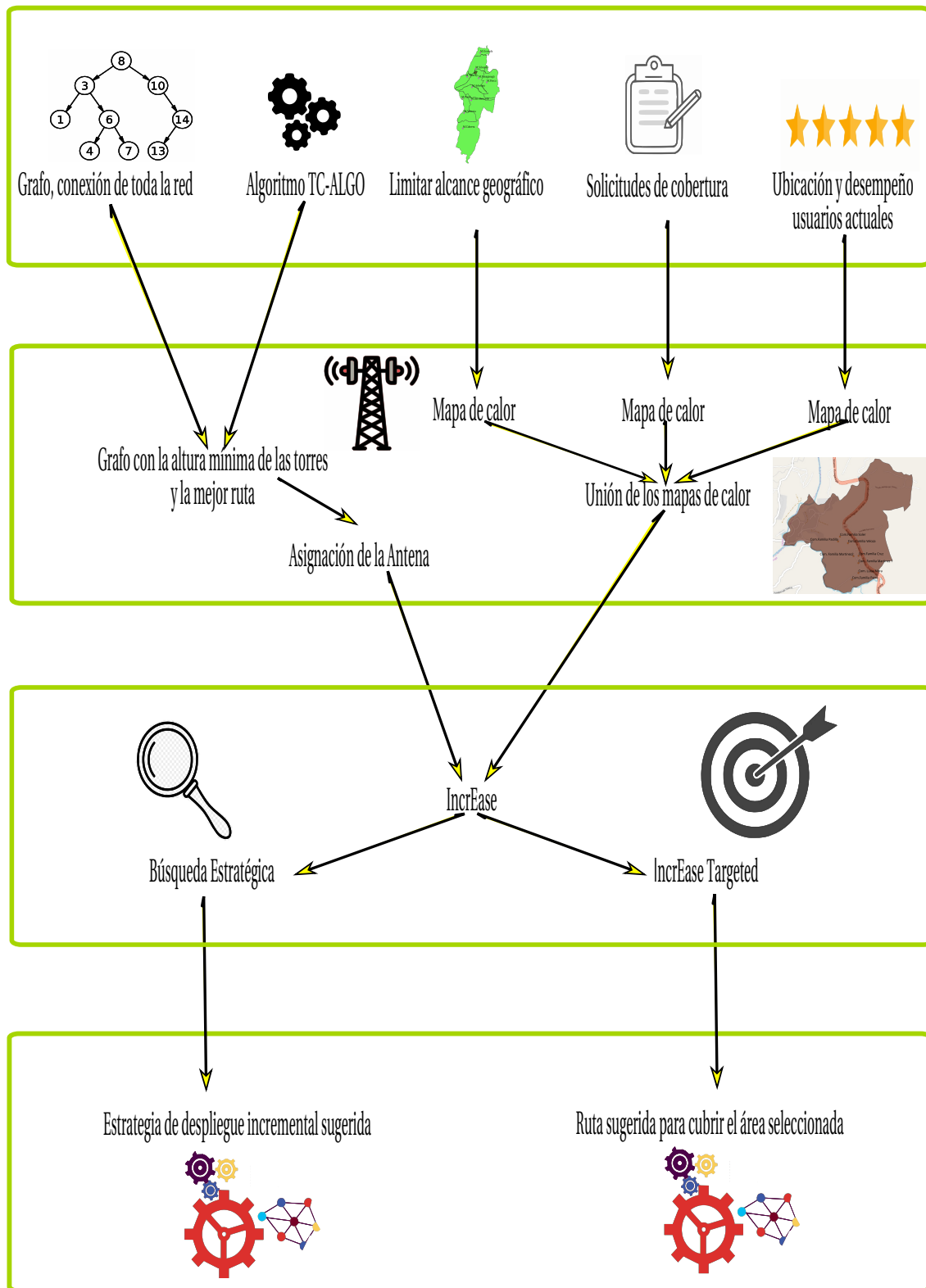


Figure 5: Diagrama sistémico

este algoritmo contiene a START-TC-ALGO (algoritmo que permite recorrer el grafo y ubicar el menor enlace o conjunto de enlaces que representan el menor costo beneficio), también, contiene la función de costos $C(n)$

- Limitar el alcance geográfico: Se delimita la región en dónde se desea expandir la red existente
- Solicitudes de cobertura: sectores o usuarios que desean adquirir el servicio de conectividad

2. **Generar mapas de calor**

Se generan tres mapas de calor diferentes

- Mapa de calor en el que se delimite el alcance geográfico que va tener la red a expandir
- Mapa de calor de las solicitudes de cobertura: sugiere los lugares en los que se encuentra mayor cantidad de usuarios que solicitan el servicio
- Mapa de calor de la ubicación y desempeño de los usuarios actuales: Permite saber la ubicación de los usuarios que hacen parte de la red actual y el nivel de funcionamiento de estos nodos

Una vez se han obtenido los mapas de calor se hace la unión de los tres a fin de determinar que lugares se deben cubrir con mayor prioridad, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio, es decir, que permita el acceso a internet a la mayor cantidad de personas posible pero a un bajo costo.

Al mapa de calor que surge de la unión realizada con anterioridad se le anexa el grafo con la altura mínima de las torres y la mejor ruta que se debe cubrir, además de asignar las antenas para cada torre.

3. **IncrEase**

En este paso se combinan los resultados obtenidos en el paso anterior y esos datos ingresan a IncrEase. Esta herramienta proporciona dos modos de operación

- Búsqueda estratégica
- IncrEase targeted

4. **Salida: obtener una respuesta de planeación de redes inalámbricas rurales económica**

Los dos modos de operación de IncrEase generan dos salidas:

- Búsqueda estratégica: estrategia de despliegue incremental sugerida
- IncrEase targeted: ruta sugerida para cubrir el área seleccionada

3.2.3 Determinar los requerimientos necesarios para ejecutar el algoritmo

El estándar IEEE 830-1998 para el SRS(en inglés) o ERS (Especificación de requerimientos de software) es un conjunto de recomendaciones para la especificación de los requerimiento o requisitos de software, basado en este estándar se determina:

- **Requerimientos funcionales**

Identificador del requerimiento	In1
Nombre del requerimiento	Requerimiento de cobertura
Características	Calidad de la cobertura de la red existente
Descripción del requerimiento	Es un parámetro de entrada al algoritmo para saber la eficiencia del funcionamiento de la red
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del requerimiento	In2
Nombre del requerimiento	Ubicación de los usuarios
Características	Identificación de la ubicación geográfica de los usuarios
Descripción del requerimiento	Detallar la localización geográfica de los usuarios para analizar la topografía del terreno
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

3.2.4 Codificación del algoritmo

3.3 Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple

3.4 Aplicar el algoritmo propuesto en la Red Libre de Boschoque analizando la topología adecuada para futuras expansiones de la red en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz-Cundinamarca considerando la relación costo-beneficio

4 Capítulo 4. Análisis de resultados y discusión

5 Conclusiones y trabajos futuros

Bibliografía

Abido, M.A. 2002. "Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm." *Electric Power Components and Systems*, 469–83.

Amaldi, Capone, E. 2003. "Planning Umts Base Station Location: Optimization Models with Power Control and Algorithms." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2 (septiembre): 939–52.

Bernardi, Giacomo. 2012. "Deployment and Operational Aspects of Rural Broad-band Wireless Access Networks." PhD thesis, University of Edinburgh.

Flickenger, Rob (Ed.). 2013. *REDES Inalmbricas En Los Paises En Desarrollo : Una Guia Practica Para Planificar Y Construir Infraestructuras de Telecomunicaciones de Bajo Costo*. Vol. 4. Hacker Friendly LLC. <http://wndw.net/>.

Gordejuela-Sanchez, F, A. Juttner, and J. Zhang. 2009. "A Multiobjective Optimization Framework for Ieee 802.16e Network Design and Performance Analysis." *Proc. of IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.

Gordillo, Wilson. 2013. "Redes Libres- Enlaces Digitales Con Sentido Social." *ENGI. Revista Electrónica de La Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca* 2: 2: 11–13.

guifi.net. 2016. "Guifi.net- El Proyecto Tecnológico." December. <https://guifi.net/>

es/proyecto-tecnologico.

IBM. 2019. “Redes Y Planificación de Redes.” https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSFKSJ_7.5.0/com.ibm.mq.pla.doc/q004730_.htm.

NetworkX. 2019. “Overview of Networkx.” April. <https://networkx.github.io/documentation/stable/#>.

Raisanen, L., and R. M. Whitaker. 2005. “Comparison and Evaluation of Multiple Objective Genetic Algorithms for the Antenna Placement Problem.” *Mobile Networks and Applications* 10 (febrero): 79–88.

Rendon Gallon, Álvaro, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Andres Martinez Fernandez, eds. 2011. *Tecnologías de La Información Y Las Telecomunicaciones Para Zonas Rurales*. MASERATTI: Mejora de la atención sanitaria en entornos rurales mediante aplicaciones de telemedicina sobre tecnologías inalámbricas.

Ríos Rivera, Milton, and Leonardo Rodríguez Mújica. 2015. “Solución Al Problema de Construcción de La Topología En Redes Rurales Inalámbricas.” *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)* I (julio): 1–9.

Sen, Sayandeep. 2006. “Topology Planning for Long Distance Wireless Mesh Networks.” Master’s thesis, Indian Institute of Technology,

Sen, Sayandeep, and Bhaskaran Raman. 2007. “Long Distance Wireless Mesh Network Planning: Problem Formulation and Solution.” *ACM Int. Conference on World Wide Web (WWW)*, mayo, 893–902.

St-Hilaire, Marc. 2008. “Topological Planning and Design of Umts Mobile Networks: A Survey.” *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING* 9 (julio): 11.

Whitaker, R., and S. Hurley. 2003. “Evolution of Planning for Wireless Communication Systems.” *Proc. of Annual Hawaii Int. Conference on System Sciences*, 10.