

Contents

1	MARCO TEÓRICO	1
1.1	Brecha Digital	1
1.2	Redes Libres Comunitarias	2
1.2.1	Características de RLC	2
1.3	Planeación de Redes Inalámbricas	3
1.3.1	Factores clave de la planeación	3
1.4	Algoritmos utilizados en la planeación	3
1.5	Representación de la topología	4
1.5.1	Grafo	4
1.6	Herramientas de manipulación de grafos	5
1.6.1	Python	5
1.6.2	NetworkX	5
2	ESTADO DEL ARTE	6
2.1	Planeación de redes móviles UMTS	6
2.1.1	Planeación de Celda	7
2.1.2	Redes WiMAX	10
2.2	Redes BWA en zonas Rurales	12
2.2.1	Consideraciones de diseño y enfoque de solución	14
2.2.2	Construcción de redes	16
2.2.3	Topología	16
2.2.4	Costo de las torres	17
	Bibliografía	17

1 MARCO TEÓRICO

1.1 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)).

1.2 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.

1.2.1 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)).

1.3 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.

1.3.1 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.

1.4 Algoritmos utilizados en la planeación

Aunque existen estructuras de algoritmos para solucionar problemáticas en la planeación incremental de redes inalámbricas (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 (Abido2002). Este algoritmo permite encontrar una ubicación de las torres en la fase de planeación para lograr un óptimo rendimiento de la red.

1.5 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))

1.5.1 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 $G = (V, A)$, donde:

- 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 .

1.6 Herramientas de manipulación de grafos

1.6.1 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)).

1.6.2 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 ESTADO DEL ARTE

2.1 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*”).

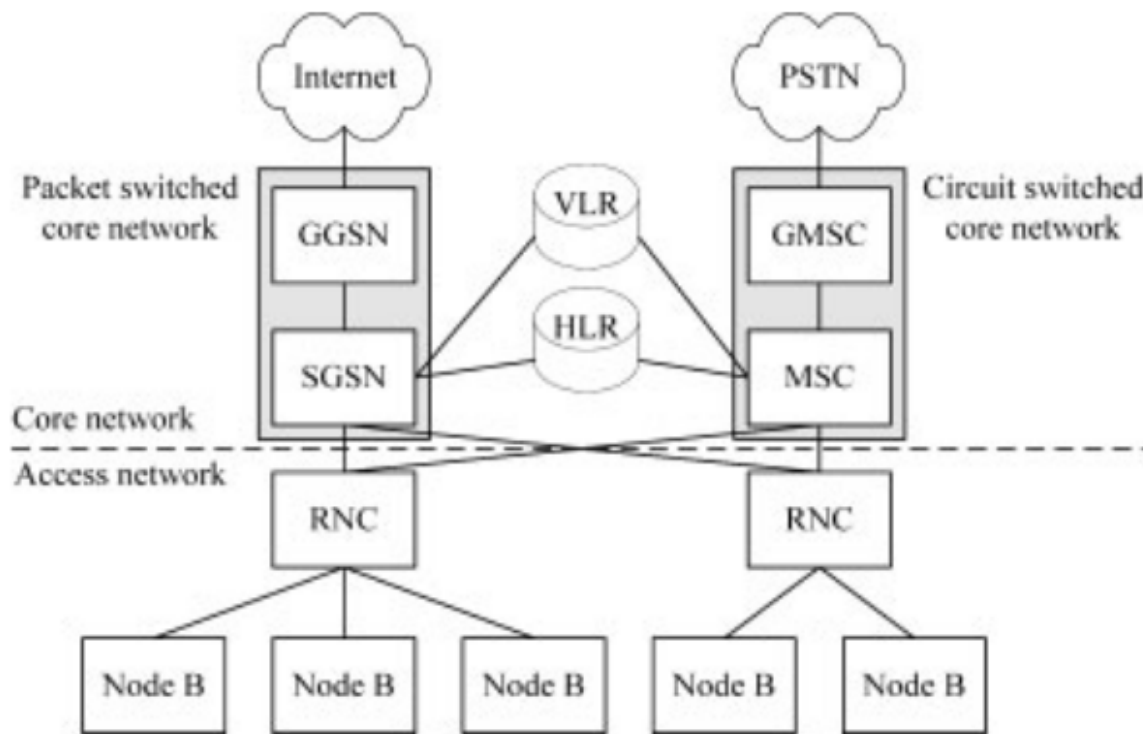


Figure 1: Estructura básica de una infraestructura UMTS. Tomado de St-Hilaire (2008)

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.

2.1.1 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.

2.1.1.1 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.

2.1.2 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:

- Aérea 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.

2.2 Redes BWA en zonas Rurales

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.

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 un distrito ubicado en la India, un país donde la mayoría de la población vive en áreas rurales (66% según el Banco Mundial) y está en el lado equivocado de la brecha digital, esto se resuelve dando conectividad a todas las aldeas y pueblos. Lograr esto expandiendo la red actual de telefónica corriente 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.

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.

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 pueblación, 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 rendimiento de la red, se estipulan de tres principales restricciones:

1. Aplicación (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:

El rendimiento 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.

El rendimiento depende del tipo de antena

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 ahorrara los costos principales del despliegue de una red.

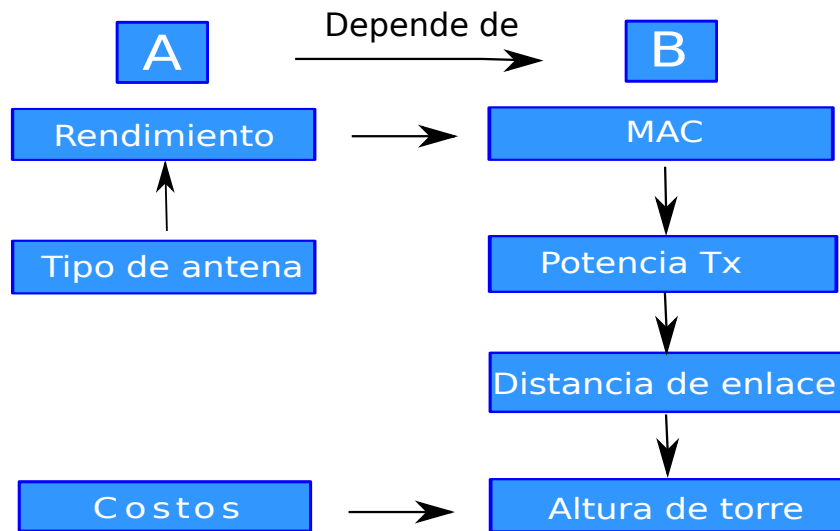


Figure 2: Dependencias de requerimientos

2.2.1 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.

Una vez implementada la planeación de la red, el autor en los resultados concluye que se ahorró 22% con respecto a una planeación sin ninguna técnica de optimización.

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.

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).

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. 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.

La falta de herramientas de software para el diseño, gestión y evaluación de redes de acceso inalámbrico de banda han obstaculizado su despliegue generalizado a pesar de sus costos y ventajas operativas sobre otras alternativas de Tecnologías de acceso de banda. *Bernardi* desarrolla un paquete de software para llenar esta brecha, 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

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 nivel local, (Ríos Rivera and Rodríguez Mújica 2015) propone una solución de construcción de topología en redes rurales inalámbricas en la región del sumapaz-Colombia. 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:

2.2.2 Construcción de redes

Dentro de este campo determina elementos tales como:

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

2.2.3 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.

2.2.4 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

De lo anterior determina que el coste de la torres es directamente proporcional a su altura.

Bibliografía

Amaldi, Capone, E. 2003. "Planning Umts Base Station Location: Optimization Models with Power Control and Algorithms." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2: 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 2016. <https://guifi.net/es/proyecto-tecnologico>.

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

NetworkX. 2019. "Overview of Networkx." April 2019. <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: 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: 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)*, 893–902.

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

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