

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA POLITÉCNICO GRANCOLOMBIANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS**

**INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL USO DEL ESPECTRO  
RADIOELÉCTRICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS OPERATIVOS DE  
ENLACES MICROONDAS EN LA RED DE TRANSPORTE DE LA EMPRESA DE  
TELECOMUNICACIONES COLOMBIA MOVIL S.A E.S.P.**

**PRESENTA:**

**JUAN SEBASTIAN HERNÁNDEZ AMÓRTEGUI**

**1310010809**

**ASESOR:**

**MSC. WILMAR JAIMES FERNÁNDEZ**

**ACRÓNIMO:**

**PMUERRCOEMRTETCM**

**2016**

# ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	2
Índice de tablas .....	4
Índice de figuras.....	5
1. Resumen.....	6
2. Abstract.....	6
3. Palabras clave.....	7
4. Key words .....	7
5. Introducción.....	8
6. Marco teórico .....	11
6.1. Radioenlaces .....	11
6.2. Throughput.....	14
6.3. Optimización .....	15
6.4. Gestión de proyectos .....	19
7. Marco legal.....	22
8. Estrategia metodológica.....	27
8.1. Disminución de la cantidad de canales por enlace .....	28
8.2. Reducción de ancho de banda en enlaces de última milla.....	31
8.3. Gestión de la radicación.....	33
9. Desarrollo e implementación.....	34
9.1. Recanalización para el uso óptimo del uso del espectro contratado.....	34
9.1.1. Inventariado de la red orientado a la cantidad de canales por enlace con múltiples canales.....	34
9.1.2. Desarrollo del algoritmo de búsqueda de recanalización para la disminución del número de canales por enlace .....	37
Función objetivo .....	37
Restricciones .....	38
Variables de decisión.....	38

Algoritmo .....	39
9.2. Valoración y ajuste del ancho de banda para enlaces de última milla .....	41
9.2.1. Inventariado de la red enfocado al ancho de banda de los enlaces de última milla .....	41
9.2.2. Desarrollo del algoritmo para la búsqueda de configuración del canal para la reducción del ancho de banda en los enlaces de punta.....	45
Función objetivo .....	45
Restricciones .....	46
Variables de decisión.....	46
Algoritmo .....	47
9.3. Gestión para la radicación de las modificaciones ante el MinTIC y la ANE	49
10. Análisis de resultados.....	53
10.1. Recanalización para el uso óptimo del espectro contratado .....	53
10.2. Valoración y ajuste de ancho de banda para enlaces de última milla ...	55
10.3. Gestión para la radicación de las modificaciones ante el MinTIC y la ANE	57
11. Conclusiones .....	59
12. Referencias .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Designaciones de banda CCIR .....	13
Tabla 2. Tabla A.2.1 Factor de ancho de banda del enlace. ....	23
Tabla 3. Tabla A.2.2 Factor de valoración de frecuencia del enlace. ....	24
Tabla 4. Relación de planes de distribución de frecuencias de acuerdo a la recomendación de la UIT en el CNABF. ....	24
Tabla 5. Convenciones de las columnas del cuadro de características técnicas de la red (CCTR). ....	26
Tabla 6 Posibilidades de recanalización según el número de canales original. ....	30
Tabla 7. Inventario de enlaces por banda de operación. ....	34
Tabla 8. Distribución de redes en función del número de canales. ....	35
Tabla 9. Valor anual de contraprestación por banda de operación y número de canales por enlace. ....	36
Tabla 10. Convención sobre el pseudocódigo para la reducción de número de canales de los enlaces de la red de transporte. ....	41
Tabla 11. Distribución de enlaces según el ancho de banda total y el tipo de enlace. ....	42
Tabla 12. Distribución del ancho de banda de la red de acuerdo al tipo de enlace y a la magnitud de los ancho de banda usados en el CNABF .....	42
Tabla 13. Distribución del V.A.C. según el tipo de enlace y los anchos de banda utilizados en el CNABF. ....	44
Tabla 14. Convenciones del pseudocódigo para reducción de anchos de banda en enlaces de última milla. ....	49
Tabla 15. Numeración de actividades para la radicación de las modificaciones a la red a partir de los resultados obtenidos en las dos primeras partes del proyecto. ....	50
Tabla 16. Detalle de la reducción del Valor anual de contraprestación por red. ...	53
Tabla 17. Valor anual de contraprestación por propuesta y escenario. ....	55
Tabla 18. Ancho de banda total por propuesta y escenario .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Subdivisión de la banda de frecuencia. Tomado de Lehpamer, Microwave Transmission Networks [2] .....	14
Figura 2 Diagrama de flechas del método de ruta crítica. Tomado de Lester Albert, Project Planning and control [9].....	21
Figura 3 Red de precedencias del método de ruta crítica. Tomado de Lester Albert, Project Planning and control [9].....	21
Figura 4 Valor Por MHz (Tomado del valor medio de los rangos en la tabla A.2.1 de la resolución 2877 de 2011) .....	28
Figura 5 Aporte al V.A.C. según la cantidad de canales por enlace. Elaboración propia a partir del CCTR 24062.....	37
Figura 6. Distribución porcentual del V.A.C. según el tipo de enlace y los anchos de banda definidos en el CNABF. Elaboración propia a partir de la base de datos del aplicativo TesGestión. ....	45
Figura 7. Red de precedencias para el proceso de radicación de modificaciones de la red de transporte. ....	52
Figura 8. Comparación del valor anual de contraprestación original y propuesto según el estado del enlace, junto al valor total de ahorro de los mismos.....	54
Figura 9. Valor anual de contraprestación actual y propuesto por escenario. ....	56
Figura 10. Ancho de banda total de la red actual y propuesto por escenario.....	57

## **1. RESUMEN**

El presente proyecto propone la reducción de costos de operación para los enlaces de tipo microondas de la red de transporte de la empresa de telecomunicaciones Colombia Móvil S.A. E.S.P. por la modificación de la situación actual de las características técnicas de los radioenlaces contratados ante el Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones y la Agencia nacional del espectro. La reducción del valor anual de contraprestación cancelado al Fondo de las tecnologías de la información y las comunicaciones por los enlaces de servicio fijo se aborda desde dos enfoques: El primero está orientado a la reducción de canales por enlace y el segundo se dirige a la disminución del ancho de banda en los enlaces de última milla. Para la resolución de ambos enfoques se tiene en cuenta la ley que rige la utilización del espectro y es aplicada una estrategia de optimización basada en metaheurísticas de búsqueda por entornos según las restricciones y características de las variables enmarcadas en la definición del problema de optimización. Se gestiona además la radicación de la modificación de la red como solicitud de interés aplicando el método de ruta crítica sobre las tareas previas que componen todo el proceso.

## **2. ABSTRACT**

The present project's purpose is the reduction of the operational cost for the microwave links on the backhaul network of the telecommunications company Colombia Movil S.A. E.S.P. by modifying de current situation of the technical features of the microwave links contracted with the Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones and the Agencia nacional del espectro. The reduction of the anual value payed to the Fondo de las tecnologías de la información y las comunicaciones by the fixed service links is taken from two different approaches: The first one is oriented to reduction of the quantity of channels per link, and the second one is oriented to the diminution of the band width on the last mile links. In order to solve both of the approaches is taken into account the law that rules the spectrum use and is applied an optimization strategy based on finding by surrounding metaheurísticas according to the restrictions and features of the variables defined on the optimization problem. Furthermore is managed the

presentation of the network changes as interest request by applying the critical path method on the previous tasks that compound the entire process..

### **3. PALABRAS CLAVE**

Recanalización, radioenlaces, optimización, metaheurística, ruta crítica.

### **4. KEY WORDS**

Recanalization, radio-links, optimization, metaheuristics, critical path.

## 5. INTRODUCCIÓN

Desde hace un poco más de dos décadas en Colombia las comunicaciones móviles han estado en constante desarrollo, debido a distintos factores como la introducción de los primeros operadores de telefonía móvil del mercado<sup>1</sup>, las tendencias globales en cuanto a comunicación y la creciente demanda de los servicios de comunicación móviles, entendidos hoy en día como voz y datos de navegación por internet.

Acorde a estos factores han sido necesarios ajustes y actualizaciones de los equipos encargados de la transmisión de la información. Ésta necesidad ha sido satisfecha gracias a los avances en distintas áreas de la ciencia, la tecnología y la ingeniería, haciendo posible; por ejemplo, que hoy en día se logre superar la capacidad de transmisión de los primeros enlaces de medios guiados, en más de 750 veces<sup>2</sup>.

Siendo consecuentes con la mayor demanda de servicios de telecomunicaciones como telefonía móvil, fija y televisión digital, se han estado implementando redes de medios guiados ópticos tal como se preveía por algunos ingenieros: Redes de fibra óptica con estructuras de malla en los bordes de la red y con estructura de anillo en dirección a la red de núcleo [1]. Sin embargo los tendidos de fibra óptica están limitados por la accidentalidad del terreno y específicamente en Colombia por la geografía con cordilleras y selvas.

Además de la limitación física del terreno, el tendido de fibra óptica resulta menos rentable que soluciones de telecomunicaciones de medios no guiados. Es por estas razones que en Colombia una gran parte de los enlaces de los tendidos de la red de transporte (o backhaul) de distintos operadores están implementados como redes fijas punto a punto o radioenlaces que operan en la banda SHF (Super High Frequency).<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Con la ley 37 de 1993, “Por la cual se regula la prestación del servicio de telefonía móvil celular, la celebración de contratos de sociedad y de asociación en el ámbito de las telecomunicaciones y se dictan otras disposiciones”.

<sup>2</sup> Relación de capacidad de enlaces E1 y Ethernet (2Mbps vs. 155Mbps).

<sup>3</sup>Radio banda de frecuencia de 3GHz a 30GHz definida por la ITU (International Telecommunications Union).

La operación de los radioenlaces se define en función de una banda de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico. En Colombia éste último es considerado un recurso natural de la nación, por lo que es el gobierno quien se encarga de emitir regulaciones que permitan su aprovechamiento y administración óptimos. La Agencia Nacional del Espectro (ANE) respaldada por el Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC), es la entidad pública encargada de la administración, gestión y cobro de la contraprestación por el uso del espectro radioeléctrico en Colombia<sup>4</sup>.

La empresa Colombia Móvil S.A E.S.P. (TigoUne comercialmente) es uno de los principales operadores de telecomunicaciones del país, junto a Claro y Movistar<sup>5</sup>. El tendido de su red de transporte incluye además de anillos de red de fibra óptica, enlaces fijos punto a punto o radioenlaces y al igual que los otros operadores debe tramitar el uso de la porción del espectro radioeléctrico para cada uno de ellos ante el MinTIC y la ANE. Dada la naturaleza de contratación periódica (anual) de la porción del espectro para un par de estaciones, la contraprestación es considerada un costo operacional.

Siendo una compañía con ánimo de lucro Colombia Móvil S.A E.S.P. está en búsqueda constante de reducción de costos de operación. Enmarcado en esta directriz de crecimiento empresarial se propone un plan de mejoramiento del uso del espectro radioeléctrico contratado, que resulte en una reducción de costos de operación para los enlaces microondas en la red de transporte de la compañía, teniendo en cuenta la estructura actual de la red, disponibilidad y características técnicas de los equipos en campo y próximos a instalar.

Este plan de mejoramiento consta de dos partes: A) Recanalización para el mejor uso del espectro contratado; B) Valoración y ajuste de ancho de banda para enlaces de última milla. Para el desarrollo de éstas, se parte de los siguientes objetivos específicos:

---

<sup>4</sup> Según la ley 1341 del 30 de Julio de 2009, "Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones –TIC-, se crea la Agencia Nacional de Espectro y se dictan otras disposiciones".

<sup>5</sup> Según el Boletín trimestral de las TIC - Cifras del primer trimestre de 2016.

1. Inventariar los enlaces licitados por Colombia Móvil S.A E.S.P. ante el MinTIC y la ANE, en cuanto a la banda de operación, ancho de banda, número de canales, modulación y separación de frecuencias de transmisión y recepción, de acuerdo al Cuadro Nacional de Atribución de bandas de frecuencias (CNABF), obteniendo un balance de la red que refleje los factores enumerados que posteriormente resultará útil para determinar el alcance final del plan de mejoramiento.
2. Diseñar e implementar un algoritmo de metaheurística, capaz de listar los posibles cambios de recanalización para los enlaces existentes que resulten en una disminución de los costos de operación junto con la proyección de ahorro.
3. Identificar y proponer un esquema de reducción de anchos de banda para los enlaces de última milla, basado en el throughput y la capacidad de transmisión real disponible, haciendo uso de un algoritmo a metaheurística.
4. Planear y gestionar el proceso de legalización de las modificaciones de la red ante el MinTIC.

## 6. MARCO TEÓRICO

Esencialmente el presente proyecto es un problema de optimización y de gestión de proyectos, que requiere del conocimiento y manejo en temas de telecomunicaciones. A continuación son expuestos algunos de los conceptos críticos de estos componentes, con el fin de dar una base teórica suficiente al lector para la comprensión del documento.

### 6.1. Radioenlaces

Las redes de comunicación móviles comparten una estructura general muy similar:

- Red de núcleo (Core network o backbone), donde ocurre la multiplexación, direccionamiento e interconexión con otros operadores de los servicios ofrecidos como llamadas, navegación por internet, buzón de voz y mensajería.
- Red de acceso al medio (Radio access network), por la cual los usuarios se conectan con la red núcleo. Está compuesta de los sistemas de acceso punto – multipunto distribuidos por celdas en las ciudades y áreas metropolitanas.
- Red de transporte (Backhaul), necesaria para solventar la separación física de las dos anteriores.

La red de transporte de los operadores de telefonía celular se compone principalmente de enlaces de fibra óptica y microondas, y en menor medida de enlaces satelitales y de medios guiados como el cobre o redes HFC (Hybrid fiber and copper). La transmisión por fibra óptica es la técnica; sin duda alguna, predilecta por los proveedores de servicios de telecomunicaciones debido a la capacidad de transmisión de alta velocidad que llega al orden de los Gbps (Gigabits por segundo), también conocida como GPON (Gigabit-capable passive optical network). El multiplexado compacto por división en longitudes de onda o DWDM por sus siglas en inglés (Dense wavelength division multiplexing), es la técnica que permite emplear longitudes de onda electromagnéticas, para la transmisión de información a través de un medio guiado óptico. A pesar de las altas velocidades anteriormente

mencionadas, las principales desventajas de los hilos de fibra óptica radican en su fragilidad, y en el elevado costo que implica el despliegue de una red de este tipo<sup>6</sup>.

Los radioenlaces, también llamados enlaces de microondas<sup>7</sup>, se han estado utilizando desde hace un poco más de 100 años [2]. Este tipo de comunicación inalámbrica hace uso del espectro radioeléctrico para transmitir señales en topologías de punto a punto o punto – multipunto, empleando diferentes técnicas de modulación como la modulación en amplitud (AM), en frecuencia (FM), en fase (PSK), en amplitud y fase (APSK) y en amplitud y cuadratura (QAM). La implementación de radioenlaces constituye una solución más rentable para los operadores de telefonía móvil en comparación al tendido de redes de fibra óptica; especialmente en Colombia, donde las condiciones geográficas complican el despliegue de éstas últimas, pero se convierten en una ventaja para la para la instalación de los enlaces microondas en torres de menores altitudes en cerros y montañas.

Un enlace de microondas punto a punto se compone de tres elementos: IDU (Indoor radio Unit), que cumple la función de modem o interfaz digital; ODU (Outdoor radio Unit), o equipo para conversión a radiofrecuencia; y una antena para transmitir la señal a través del espacio entre las estaciones. El despliegue de estos montajes suele hacerse en pares idénticos de equipamiento o en la medida de lo posible empleando equipos fabricados por la misma compañía.

La jerarquía plesiócrona digital o PDH por sus siglas en inglés (Plesiochronous digital hierarchy), es un estándar de tecnología usado comúnmente en las telecomunicaciones de tipo telefónico que permite enviar varios canales sobre un mismo medio; para transmisión de radiofrecuencias éste estándar provee una media de capacidad de transmisión que va desde un E1 a 16E1<sup>8</sup>.

El espectro radioeléctrico se divide en bandas o subsecciones; cada una de estas tiene un nombre y está definida por un rango de frecuencias, de acuerdo a las recomendaciones de sociedades científicas como la Unión internacional de

---

<sup>6</sup> Desplegar un kilómetro de fibra óptica cuesta aproximadamente COP\$13'000.000.

<sup>7</sup> Nombre otorgado por la longitud de onda en el orden de los micrómetros.

<sup>8</sup> Uno de los dos estándares para sistemas de transmisión digital, definido por la Conferencia Europea de administración de correos y telecomunicaciones. Equivale a 2048Mbps.

telecomunicaciones (UIT) y el Comité consultivo internacional de radio (CCIR). La distribución de las bandas sus límites y nombres se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Designaciones de banda CCIR**

<b>Número de banda</b>	<b>Intervalo de frecuencias</b>	<b>Designación</b>
2	30Hz - 300Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3kHz - 3kHz	VF (frecuencias de voz)
4	3kHz - 30kHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30kHz - 300kHz	LF (bajas frecuencias)
6	0.3MHz - 3MHz	MF (frecuencias intermedias)
7	3MHz - 30MHz	HF (frecuencias altas)
8	30MHz - 300MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	300MHz - 3GHz	UHF (frecuencias ultra altas)
10	3GHz - 30GHz	SHF (frecuencias súper altas)
11	30GHz - 300GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3THz - 3THz	Luz infrarroja
13	3THz - 30THz	Luz infrarroja
14	30THz - 300THz	Luz infrarroja
15	0.3PHz - 3PHz	Luz visible
16	3PHz - 30PHz	Luz ultravioleta
17	30PHz - 300PHz	Rayos X
18	0.3EHZ - 3EHZ	Rayos gamma
19	3EHZ - 30EHZ	Rayos cósmicos

**Fuente: Sistemas de comunicaciones electrónicas, Tomasi, W. [3]**

Como se explica más adelante en el marco legal, el espectro radioeléctrico en Colombia es considerado un recurso natural de la nación, por lo que es el Estado quien condiciona y administra su uso. La entidad pública encargada de esta tarea decide bajo que estándares y de acuerdo a cuales recomendaciones se administra el bien de la nación. El Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC) junto a la Agencia Nacional del Espectro (ANE), acatan las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

En cada una de las recomendaciones de UIT de la serie F (servicios fijos) se definen los parámetros que influyen principalmente en la elección de la disposición y distribución de los radiocanales en los que se subdividen las bandas. De éstos, el

parámetro de separación dúplex Tx/Rx DS (También conocido como Shifter) tiene una alta pertinencia para el desarrollo de este proyecto y es definido así:

*“(...) DS separación dúplex Tx/Rx, definido como la separación entre los canales de ida y retorno correspondientes, constata para cada par de frecuencias  $i$ -ésima e  $i'$ -ésima en determinada disposición de canales. (...)”*

Tomado de la Recomendación UIT-R F.746-10

Éste espacio de separación de las frecuencias según lo explica Lehpamer [2], se usa para dividir en dos partes iguales la banda de frecuencia disponible para la telecomunicación: Una parte de “ida” y otra de “retorno” (Ver la Figura 1). Si las frecuencias fueran las mismas en ambos sentidos, se chocarían en el trayecto generando interferencias destructivas y no sería posible establecer la comunicación. Éste parámetro viene predefinido en los equipos y la mayoría de ellos operan únicamente bajo un valor de separación de frecuencia dúplex, por esta misma razón la separación de canales en frecuencia en las distintas bandas, es el mismo de acuerdo a los planes de distribución recomendados por la UIT.

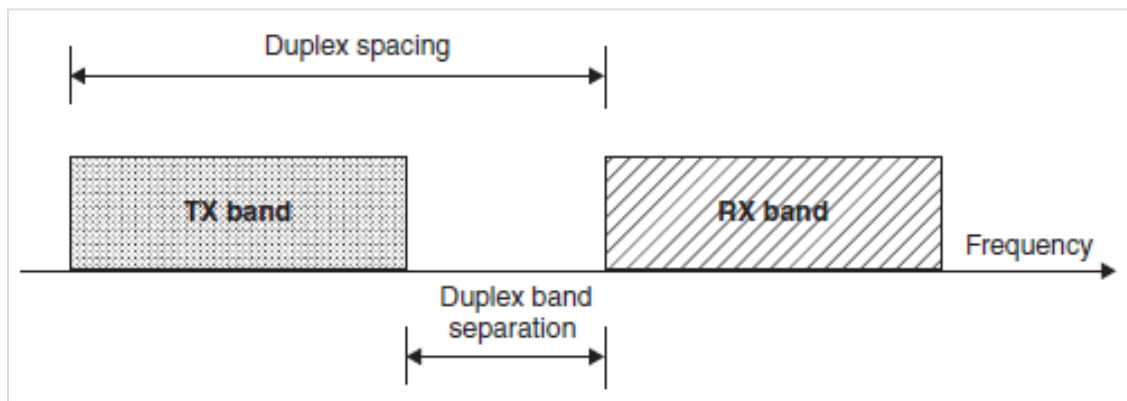


Figura 1 Subdivisión de la banda de frecuencia. Tomado de Lehpamer, Microwave Transmission Networks [2]

## 6.2. Throughput

El throughput es una medida de eficiencia de uso del canal común en el área de las telecomunicaciones digitales, es definido como la tasa máxima a la cual trabaja un canal de telecomunicaciones, es una medida relativa, específicamente relativa a la capacidad del canal. Dado que se usa en ambientes de comunicación digital los

mensajes pueden ser paquetes de datos por segundo (p/s) o bits por segundo (bits/s).

El throughput bajo ninguna circunstancia puede ser igual al cien por ciento de la capacidad total del canal, debido entre otros factores a las limitaciones físicas de los elementos o equipos utilizados, el ruido inherente al tipo de canal usado y las características de la señal transmitida. Esta última limitación específicamente se refiere a dos condiciones, cada una de ellas de acuerdo al tipo de mensaje enviado. Si se envían tramas de información, el throughput se reduce considerando la información que no hace parte de la carga útil del paquete, es decir, el encabezado, las banderas o señalizadores y la cola de la trama. En caso de que la comunicación sea posible de medir en bits por segundo se tiene en cuenta la modulación utilizada, la codificación o método de corrección de errores, el roll-off o separación entre portadoras y el ancho de banda en frecuencia. Éste último es junto a la modulación uno de los factores más importantes para poder determinar el throughput.

Hoy en día los fabricantes de equipos de transmisión entregan información precisa sobre la capacidad de los canales configurables de acuerdo a la modulación y el ancho de banda utilizado. Ésta información es crucial para el cálculo de los enlaces a implementar pues son datos obtenidos en mediciones con condiciones reales que tienen en cuenta los distintos factores que pueden afectar la transmisión en radiofrecuencia.

### 6.3. Optimización

El primer y más común acercamiento a los problemas de optimización viene de la mano de la investigación de operaciones. Uno de los más importantes puntos dentro del temario de la asignatura es el modelado matemático de problemas de optimización o programación lineal, compuesto según Hiller y Lieberman [4] por sistemas de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas entre sí y que son capaces de reproducir con éxito la esencia del problema. Estos problemas se componen de los siguientes elementos:

- *Variables de decisión*, decisiones cuantificables que se relacionan entre sí, pueden de ser de tipo booleano o entero según el alcance y descripción de las restricciones.

- *Función objetivo*, función matemática de las variables de decisión que mide el desempeño de la solución o respuesta.
- *Restricciones*, expresiones matemáticas de las limitaciones impuestas sobre las variables de decisión.
- *Parámetros del modelo*, coeficientes o constantes dentro de la función objetivo y las restricciones.

Los resultados de la aplicación de un modelo matemático o de programación lineal se pueden condensar en los siguientes conceptos:

- *Solución factible*, para la cual todas las restricciones son satisfechas.
- *Solución no factible*, aquella solución para la cual al menos una de las restricciones se viola.
- *Región factible*, conjunto de todas las soluciones factibles.
- *Solución óptima*, o valor más favorable es una solución factible que proporciona el mejor desempeño según la función objetivo.

Los modelos de programación lineal tienen un amplio alcance; por ejemplo, con el método simplex es posible hallar soluciones óptimas para problemas con un gran número de variables de decisión gracias a la base de álgebra matricial en la que se fundamenta.

Resumiendo, los modelos de programación lineal en investigación de operaciones son herramientas muy poderosas para la solución de problemas de optimización. Sin embargo no son la única herramienta disponible para la resolución de este tipo de problemas y son en algunas ocasiones, de acuerdo a la naturaleza misma del problema, rígidos, debido al corto alcance disponible para la definición de restricciones que no son fácilmente descritas en una expresión matemática.

Opuesto al calificativo de exacto, que bien puede ser asociado a los modelos de programación lineal, existe el término heurístico. La palabra heurística proviene del griego 'εὕρισκειν' que significa "hallar" o "inventar"<sup>9</sup> y está relacionada con la famosa expresión utilizada por Arquímedes tras descubrir el principio de la física que lleva su nombre, en el medio de un baño (*Eureka*).

En investigación de operaciones, heurístico es el calificativo para referirse a un procedimiento de resolución de problemas con una concepción diferente.

---

<sup>9</sup> Según el Diccionario de la lengua española (DLE) de la Real Academia Española (RAE).

Esencialmente la diferencia radica en el empleo del conocimiento acerca de un problema; que bien puede ser entendido como un alto grado de confianza, experticia o dominio sobre el núcleo del mismo, con el fin de aportar un conjunto de soluciones factibles que no necesariamente garantizan su calidad óptima [5].

El prefijo 'meta-' significa "junto a", "entre", o "acerca de"<sup>10</sup> y en la palabra 'metaheurística' se refiere a un método, estrategia o procedimiento que va más allá de la heurística. La interpretación del término actualmente está relacionada con lo que se percibe como una forma inteligente de resolver un problema. En éste sentido, una metaheurística no sigue una estructura fija y permite modelar la solución de un problema de optimización de acuerdo al dominio del tema, las herramientas y recursos disponibles.

Las metaheurísticas, pueden ser clasificadas de forma general en función del tipo de procedimiento al que hacen referencia. Los siguientes cuatro son algunos de los grupos fundamentales de metaheurísticas:

- *De relajación*: Son procedimientos que utilizan simplificaciones del problema, modifican el problema de optimización resultando más sencillo de resolver.
- *De construcción*: Orientan la solución de un problema a partir de la solución modular de los componentes del problema.
- *De búsqueda*: Son algoritmos de búsqueda guiados por movimientos o transformaciones, para recorrer el espacio de soluciones posibles en estructuras denominadas entornos.
- *Evolutivas*: Hallan la solución del problema a través de la evolución de un conjunto de posible de soluciones al interpolarlas y relacionarlas según los requerimientos establecidos.

Son de especial interés para éste proyecto las metaheurísticas de búsqueda, pues aportan algoritmos o estrategias para hallar soluciones en un espacio de alternativas cuyos elementos son soluciones posibles del mismo. El procedimiento general que siguen estas metaheurísticas es el siguiente:

1. Partiendo de una situación inicial; que puede ser específica o aleatoria,
2. aplicar iterativamente una operación, movimiento o transformación, para cambiar la situación actual,

---

<sup>10</sup> Según el Diccionario de la lengua española (DLE) de la Real Academia Española (RAE).

### 3. hasta alcanzar la situación buscada.

La situación inicial del problema puede ser especificada por el usuario de la estrategia de búsqueda, como bien puede ser determinada de forma aleatoria, puede incluso partir de varios puntos con el fin de obtener información de diferentes entornos en la misma medida y así llegar a una solución que asegure un óptimo local.

En cuanto a la selección de los movimientos pueden ser tan complejos o sencillos como lo desee el usuario, desde el recorrido del espacio de soluciones posibles de acuerdo a un criterio de ordenación, hasta la transformación inteligente del mismo de acuerdo a los resultados obtenidos en cada evaluación de la situación.

El alcance de la situación deseada es determinado por una condición de parada. Esta condición es de alta importancia, dado que para algunos algoritmos podría suceder que no se encuentre mejora o situación deseada, por lo que la búsqueda seguiría indefinidamente. Además la condición de parada puede ser independiente de la evaluación de la función objetivo.

Formalmente, un problema de optimización con una función objetivo se compone del espacio de soluciones  $S$  y una función objetivo  $f$ . Resolver el problema de optimización  $(S; f)$  consiste en determinar una solución óptima, es decir, una solución factible  $x^* \in S : f(x^*) \leq f(x) \forall x \in S$ , en caso de que la función objetivo sea de minimización y  $x^* \in S : f(x^*) \geq f(x) \forall x \in S$ , si es de maximización.

Las metaheurísticas de búsqueda funcionan con el concepto de entornos, regiones del espacio de soluciones que son construidos a partir de los movimientos desde una solución, dando lugar a una relación de vecindad. En términos matemáticos: Un entorno  $E$  sobre un espacio de soluciones  $U$  y cada solución  $x$ , es una función  $E: U \rightarrow 2^U : \forall x \in U: E(x) \subseteq U$  de soluciones vecinas a  $x$ .

La estructura de entornos es la base de las metaheurísticas de *búsqueda local*, pues se reduce el espacio de soluciones posibles definido por el entorno. Contrariamente, las metaheurísticas de *búsqueda global*, aseguran la evaluación de la totalidad del espacio de soluciones, al escapar de situaciones en las cuales la búsqueda queda atrapada en zonas del espacio de soluciones, donde no es posible hallar una mejor solución.

Si la búsqueda realizada solo tiene como criterio la estructura del entorno en donde está siendo evaluada la solución, se denomina *no informada*. A su vez una

búsqueda no informada puede clasificarse en tres categorías de acuerdo a la forma de la condición de parada: *Exhaustiva*, cuando se recorre todo el espacio local de soluciones finito o entorno y se selecciona la mejor solución; *Parcial*, en la que se establece una pauta para la organización de las soluciones posibles del espacio y se determina de forma *sistemática* una condición de parada sin tener que llegar a completar el recorrido por el espacio de soluciones; o *Aleatoria*, que intensifica la búsqueda cuando se halla una solución factible dentro del espacio tras definir un patrón de recorrido.

Una búsqueda en la cual la condición de parada contiene de forma implícita o explícita la evaluación de la función objetivo, se denomina *monótona*. Éste tipo de búsquedas se caracterizan porque el recorrido que siguen únicamente es guiado por la aplicación de movimientos que mejoren la situación actual. De forma análoga una búsqueda *no monótona* permite movimientos que no aseguran el mejoramiento de la solución actual.

Con la previsión del rápido y exponencial crecimiento de las telecomunicaciones, desde inicios del milenio fueron publicados libros y artículos en los que se aplican métodos heurísticos a las telecomunicaciones; tales como: La aplicación de metaheurísticas evolutivas para el diseño de redes de confianza; La búsqueda tabú y de dispersión evolutiva para problemas de red de topologías diversas con aplicaciones al diseño de redes de líneas arrendadas; o la heurística adaptativa basada en la demanda para la reducción del tráfico en sistemas de información distribuidos [6]. Más recientemente es posible encontrar estos métodos de optimización en aplicaciones específicas sobre la planificación de redes de transporte con enfoque en la topología usada [7] o sobre la red de acceso inalámbrico [8].

#### 6.4. Gestión de proyectos

El manejo adecuado de tiempos, recursos y procesos, es una cualidad indispensable para un ingeniero hoy día, debido a la necesidad de asumir un rol administrativo para la toma de decisiones sobre la planeación, dirección y ejecución de un proyecto de cualquier índole. Es por esta razón que algunos ingenieros han enfocado esfuerzos en desarrollar estrategias o mecanismos que guíen de la mejor manera el desarrollo de un proyecto.

El método de la ruta crítica (Critical Path Method en inglés) es una de las estrategias más populares para la administración de los recursos de tiempo y costo. Fue por primera vez desarrollado de forma casi simultánea en 1958 por dos entidades distintas: la Junta central generadora de electricidad británica (CEGB por sus siglas en inglés) y la Armada estadounidense en conjunto con las firmas DuPont y RemingtonRand [9]. A diferencia de las técnicas de revisión y evaluación de proyectos (PERT por sus siglas en inglés); método que también fue desarrollado para la misma época que el CPM, es un modelo determinístico orientado a la actividad y no al evento lo que es entendido como la posibilidad de identificar cuáles son las actividades con mayor prioridad dentro de la ruta del proyecto en ejecución.

La aplicación del método de ruta crítica puede ser representada de forma gráfica por un diagrama de flechas (Ver Figura 2) o una red de precedencias (Ver Figura 3). La principal diferencia entre las representaciones mencionadas radica en la ubicación de las actividades y los tiempos o duraciones de las mismas:

- En el *diagrama de flechas*, las actividades son representadas en las flechas por lo que el nombre de la actividad o su representación alfanumérica junto con su duración está cercana a la misma. Los nodos o círculos representan los hitos de inicio o final de la actividad. Las flechas punteadas son actividades que son ubicadas en el diagrama para representar actividades que tiene duración igual a cero, sin embargo son necesarias para determinar la procedencia de alguna actividad.
- En las *redes de precedencia* la actividad está representada en el nodo o caja y en los bordes superior e inferior de la misma se ubican las estimaciones de inicio, terminación, holgura y duración según se muestra en la convención de la Figura 3. En la red de precedencias desaparece la figura de las actividades sin duración. La red de precedencias es la representación comúnmente más utilizada por el nivel detalle y por el formato de representación de la información más completo y organizado que el de diagrama de flechas.

En las Figuras 2 y 3 es resaltada la ruta crítica. Ésta es determinada por la ruta de actividades con menor holgura (cifra en el centro del extremo inferior de la caja) que traza un flujo desde el inicio al final del proyecto.

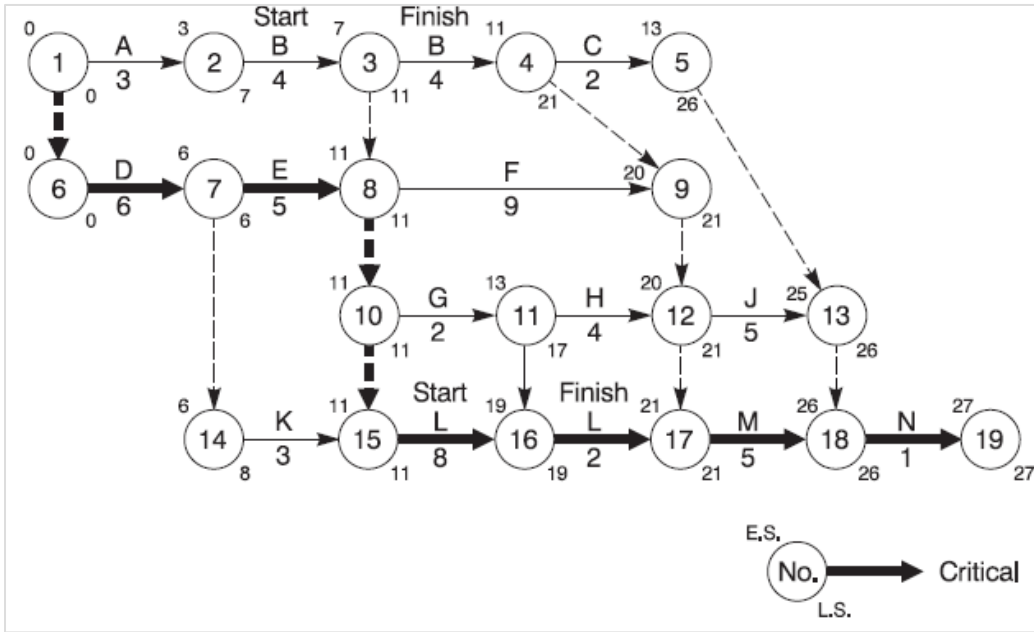


Figura 2 Diagrama de flechas del método de ruta crítica. Tomado de Lester Albert, Project Planning and control [9].

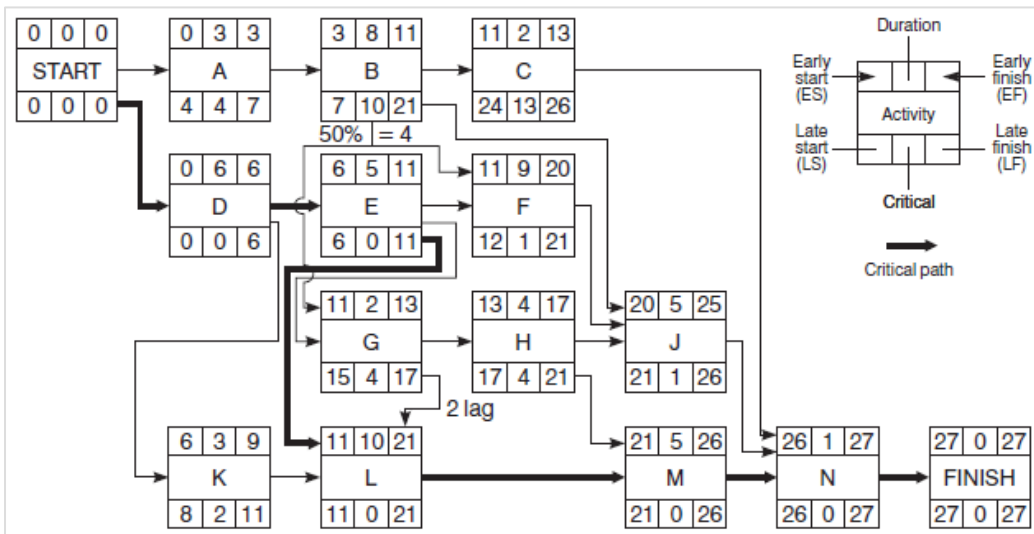


Figura 3 Red de precedencias del método de ruta crítica. Tomado de Lester Albert, Project Planning and control [9].

Determinar la ruta crítica posibilita al usuario del método para asignar prioridades a las actividades en el desarrollo de la ejecución del proyecto. Las actividades de la ruta crítica tendrían la máxima prioridad porque de ser pospuestas generarían tardanzas en el cronograma de todo el proyecto. La determinación de la holgura

además permite identificar las actividades que tienen flexibilidad en cuanto al inicio y finalización de su ejecución.

El análisis de ruta crítica actualmente puede ser modelado por computadora, basta con introducir los parámetros de las actividades para fácilmente identificar las actividades de mayor prioridad. Por ejemplo Microsoft Project 2013® permite además administrar recursos, roles, usuarios y asignar la ejecución de tareas a otros usuarios por medio del correo electrónico de Microsoft Outlook®.

## 7. MARCO LEGAL

Como se ha mencionado antes, el eje principal de este proyecto, es la disminución de costos operacionales en los que incurre Colombia Móvil S.A ESP como compañía operadora de telecomunicaciones por el uso de la porción del espectro radioeléctrico para el funcionamiento de los enlaces fijos punto a punto en la banda SHF de zonas específicas. Éste valor de contraprestación es determinado por el ministerio a través de la Resolución 2877 de 2011 [10] que modifica la Resolución 290 de 2010 [11]: “Por la cual se fija el monto de las contraprestaciones establecidas en los artículos 13 y 36 de la ley 1341 de 2009” [12]; a saber la Tabla 2, Tabla 3 y los siguientes apartes:

*“(…) **ARTÍCULO 13. - CONTRAPRESTACIÓN ECONÓMICA POR LA UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.** La utilización del espectro radioeléctrico por los proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones dará lugar a una contra prestación económica a favor del Fondo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. El importe de esta contraprestación será fijado mediante resolución por el Ministro de Tecnologías de la información y las Comunicaciones, con fundamento, entre otros, en los siguientes aspectos: ancho de banda asignado, número de usuarios potenciales, disponibilidad del servicio, planes de expansión y cobertura, demanda por el espectro y su disponibilidad y cualquier otro parámetro técnico que sirva como indicador del precio que debe recibir el Estado por la utilización del espectro radioeléctrico. La contraprestación económica de que trata este artículo deberá pagarse por el respectivo proveedor de redes o servicio de telecomunicaciones con ocasión del otorgamiento o renovación del permiso para la utilización del espectro radioeléctrico. (…)”*

Tomado de la Ley 1341 de 2009

**“(…) A.2. VALOR ANUAL DE LA CONTRAPRESTACIÓN POR LA UTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS RADIOELÉCTRICAS PARA ENLACES FIJOS PUNTO A PUNTO.** El valor anual de contraprestación (VAC) por el uso de frecuencias radioeléctricas en enlaces fijos punto a punto se liquidará con base en la siguiente fórmula:

$$VAC = (Fa) \times (Fv)$$

Dónde:

VAC: Valor Anual de Contraprestación, en salarios mínimos legales mensuales vigentes (SMLMV).

Fa: Factor de ancho de banda de la Tabla A.2.1

Fv: Factor de valoración de la Tabla A.2.2 (…)

(…) Donde F es la frecuencia central del ancho de banda asignado, expresado en MHz.

Esta fórmula debe aplicarse para cada segmento de espectro radioeléctrico asignado en cada enlace, entendiéndose por enlace, la conexión vía radiofrecuencia (RF) entre dos estaciones situadas en puntos fijos determinados. (…)”

Tomado de la Resolución 2877 de 2011

Tabla 2. Tabla A.2.1 Factor de ancho de banda del enlace.

Ancho de banda del enlace [MHz]	Fa [SMLMV]	Ancho de banda del enlace [MHz]	Fa [SMLMV]
0.002 < AB ≤ 0.010	0.40	16 < AB ≤ 20	9.80
0.010 < AB ≤ 0.020	0.60	20 < AB ≤ 24	12.00
0.020 < AB ≤ 0.030	0.80	24 < AB ≤ 28	14.00
0.030 < AB ≤ 0.060	1.10	28 < AB ≤ 32	16.00
0.060 < AB ≤ 0.100	1.30	32 < AB ≤ 36	18.00
0.100 < AB ≤ 0.125	1.50	36 < AB ≤ 40	20.00
0.125 < AB ≤ 0.250	2.00	40 < AB ≤ 44	22.00
0.250 < AB ≤ 0.50	2.30	44 < AB ≤ 48	24.00
0.500 < AB ≤ 0.750	2.60	48 < AB ≤ 52	26.00
0.750 < AB ≤ 1	3.00	52 < AB ≤ 56	28.00
1 < AB ≤ 2	3.60	56 < AB ≤ 64	31.00
2 < AB ≤ 4	4.20	64 < AB ≤ 72	35.00
4 < AB ≤ 8	4.90	72 < AB ≤ 80	39.00
8 < AB ≤ 10	5.40	80 < AB ≤ 90	43.00
10 < AB ≤ 12	6.20	90 < AB ≤ 100	48.00
12 < AB ≤ 16	7.70	100 < AB	50.00

Fuente: ANEXO A de Resolución 2877 de 2011

**Tabla 3. Tabla A.2.2 Factor de valoración de frecuencia del enlace.**

<b>Frecuencia de enlace [MHz]</b>	<b>Fv [SMLMV]</b>
3 < F ≤ 2690	1.00
2690 < F ≤ 7425	0.90
7425 < F ≤ 14400	0.80
14400 < F ≤ 21200	0.70
21200 < F ≤ 29500	0.60
29500 < F ≤ 40000	0.50
40000 < F	0.45

**Fuente: ANEXO A de Resolución 2877 de 2011**

Las frecuencias de transmisión y recepción de los enlaces que son licitados ante el MinTIC y la ANE deben apegarse a lo establecido en el CNABF [13]. En este documento se encuentran 126 tablas anexas que determinan los planes de distribución de canales radioeléctricos para el servicio fijo según las recomendaciones de la serie F (Servicios Fijos) de la ITU, como se lista en la Tabla 4:

*“(...) Se adoptan los planes de distribución de canales radioeléctricos para el servicio fijo, de acuerdo con las Recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, en las siguientes bandas de frecuencias: (...) (...) Las bandas de frecuencias de la tabla anterior se encuentran denominadas de acuerdo con la UIT-R F.746. (...)”*

**Tomado del cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias**

**Tabla 4. Relación de planes de distribución de frecuencias de acuerdo a la recomendación de la UIT en el CNABF.**

<b>Banda</b>	<b>Plan de distribución de canales</b>	<b>Recomendación UIT</b>
1.4	Tablas 17 a 18	REC.UIT-R F.1242
4	Tablas 19 a 21	REC.UIT-R F.382 REC.UIT-R F.635
U4	Tablas 22 a 26	REC.UIT-R F.1099
L6	Tablas 27 a 29	REC.UIT-R F.383
U6	Tablas 30 a 34	REC.UIT-R F.384
7	Tablas 35 a 46	REC.UIT-R F.385
8	Tablas 47 a 56	REC.UIT-R F.386
10	Tablas 57 a 60	REC.UIT-R F.747
11	Tablas 61 a 69	REC.UIT-R F.387

<b>Banda</b>	<b>Plan de distribución de canales</b>	<b>Recomendación UIT</b>
13	Tablas 70 a 73	REC.UIT-R F.497
15	Tablas 74 a 83	REC.UIT-R F.636
18	Tablas 84 a 89	REC.UIT-R F.595
23	Tablas 90 a 96	REC.UIT-R F.637
27	Tablas 97 a 103	REC.UIT-R F.748
38	Tablas 104 a 109	REC.UIT-R F.749
52	Tablas 110 a 114	REC.UIT-R F.1496
57	Tablas 115 a 126	REC.UIT-R F.1497

**Fuente: Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias**

Según el decreto 4196 de 2011 [14]: “Por el cual se modifica la naturaleza jurídica de la Agencia Nacional del Espectro y se reasignan funciones entre ella y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones”, la elaboración de los cuadros de características técnicas de la red, es asignada como función de la ANE en el artículo 1 de la misma:

*“(...) **ARTÍCULO 1. Reasignación de funciones.** Reasignar la función del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de planear y atribuir el espectro radioeléctrico, el establecimiento y mantenimiento actualizado del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de frecuencias (CNABF) y la elaboración de los cuadros de características técnicas de la red (CCTR), para la asignación de frecuencias, a la Agencia Nacional del Espectro -ANE. (...)”*

**Tomado del Decreto 4169 de 2011**

El cuadro de características técnicas de la red (CCTR) es el documento entregado por la ANE al operador que contiene las redes que han sido aprobadas tras la finalización de un proceso de selección objetiva según lo definido por la resolución 2118 de 2011 [15]: “Por la cual se establecen las condiciones, los requisitos y se determina el trámite para otorgar permisos para el uso de espectro radioeléctrico por el procedimiento de Selección Objetiva”; y el decreto 4392 de 2010 [16]: “Por el cual se reglamenta la selección objetiva y la asignación directa por continuidad del servicio de que tratan los artículos 11 y 72 de la ley 1341 de 2009”. Éste documento lista las redes aprobadas para la operación de la compañía y las características de las mismas, según las disposiciones del apéndice 4 del volumen II del reglamento de radiocomunicaciones de la ITU [17] (Lista y cuadros recapitulativos de las

características que han de utilizarse en la aplicación de los procedimientos del Capítulo III<sup>11</sup>); como se muestra en la Tabla 5:

**Tabla 5. Convenciones de las columnas del cuadro de características técnicas de la red (CCTR).**

<b>CONVENCIONES DE LAS COLUMNAS DEL CUADRO DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA RED (CCTR)</b>	
<b>IDENTIFICADOR DE COLUMNA</b>	<b>DESCRIPCIÓN (APÉNDICE 4 REGLAMENTO DE RADIOCOMUNICACIONES- RR (REV.CMR-12))</b>
1A	Frecuencia asignada
2C	Fecha de asignación de la frecuencia (nueva o modificada)
3A1	Distintivo de llamada
4A	Dirección o ubicación de la estación repetidora o radio base
4C	Coordenadas geográficas de la estación repetidora o estación base - Latitud y longitud, en grados, minutos y segundos
Tipo de estación	Referencia por el que se conoce a la estación transmisora (R - Repetidora, B - Base, M - Móvil, P - Portátil)
5A	Referencia por el que se conoce a la estación receptora (R - Repetidora, B - Base, M - Móvil, P - Portátil)
6A	Clase de estación
7A	Denominación de la estación
8AA	Potencia entregada a la antena, en W
9D	Código de tipo de polarización (V - Vertical, H - Horizontal, C - Circular, etc.)
9E	Altura de la antena sobre el nivel del suelo, en metros
9C	Ángulo de apertura total del lóbulo principal de radiación en el plano horizontal (Anchura de haz - HPBW), medido en grados
9G	Máxima ganancia de la antena (isotrópica (dBi), con relación a un dipolo de media onda (dBd), según proceda) de la antena transmisora
9A	Acimut de radiación máxima de la antena transmisora medido en el plano horizontal a partir del Norte geográfico en el sentido de las agujas del reloj
9B	Ángulo de elevación de la antena respecto al horizonte (Uptilt o Downtilt), en grados
10B	Horario normal de funcionamiento de la asignación de frecuencias (HX=24 horas). En la banda de frecuencias HF, se especifica el horario de operación

**Fuente: Cuadro de características técnicas de la red 24062 del expediente con código 95000050 [18]**

<sup>11</sup> Capítulo III: Coordinación, notificación e inscripción de asignaciones de frecuencia y modificación de Planes.

## 8. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Colombia Móvil S.A. ha estado tramitando permisos para el uso del espectro radioeléctrico desde que fueron definidos los procesos respectivos por las entidades encargadas del Estado. Ésta gestión sin duda alguna se ha hecho con la mejor intención y esfuerzo del equipo de ingenieros de planeación de la red a lo largo de los años, sin embargo los errores son parte de nuestra naturaleza humana, por lo que la toma de decisiones sobre la administración del espectro pudo haberse realizado de alguna manera mejor. Adicionalmente el entorno de la ley sobre el uso del espectro ha evolucionado según las necesidades del sector y las investigaciones realizadas por profesionales e instituciones distinguidas dentro del área de las telecomunicaciones.

En la brecha generada por los errores administrativos humanos y los cambios que ha sufrido la ley con respecto al uso del espectro, se encuentra una oportunidad de mejora de los enlaces que previamente se han licitado en el marco de la ley que rige el uso del espectro radioeléctrico en Colombia. Se busca entonces modificar la situación actual de los enlaces aprobados para la operación de Tigo como usuario del espectro, de tal forma que sea posible obtener reducciones en los costos de operación que implica el uso del mismo.

Partiendo de la definición del valor anual de contraprestación por uso de enlaces fijos o punto a punto; la cual está regida por la asociación de factores del salario mínimo legal mensual vigente con el ancho de banda del canal y la frecuencia a la que opera, es posible abstraer el tipo de relación existente entre el ancho de banda y el coeficiente asociado al mismo. Ésta relación es inversa; es decir, que el costo por MHz es menor en medida que el ancho de banda se hace mayor. Esta relación se evidencia claramente en la Figura 4.

Según la premisa anterior se definen dos enfoques desde los cuales es posible abordar la reducción de costos operacionales por el uso del espectro: En primer lugar está la disminución de la cantidad de canales contratados por enlace, dado que la licitación de enlaces ante el ministerio se hace por fracción del espectro y no por el enlace en su totalidad. El segundo enfoque está orientado a la reducción de los anchos de banda basada en el throughput en las estaciones de punta. El análisis de este indicador de la red junto con las proyecciones de crecimiento de la misma,

posibilita la determinación de la mejor configuración de ancho de banda y modulación para cada enlace.

**Figura 4 Valor Por MHz (Tomado del valor medio de los rangos en la tabla A.2.1 de la resolución 2877 de 2011)**

La reducción de costos de operación desde ambos enfoques es abordada de una manera similar:

1. Identificar, obtener y organizar la *fuentes de información* pertinente para cada enfoque.
2. Realizar un *inventario* de la red, listando las características de interés de la misma según el enfoque, con el fin de identificar en detalle el cambio obtenido tras la aplicación de un método que cumpla con los objetivos propuestos.
3. Definir un *algoritmo* capaz de cumplir con los requerimientos según el enfoque, partiendo en cada caso de la fuente de información de interés
4. Determinar la *aplicabilidad* de las propuestas construidas.

A continuación se describe en mayor detalle el procedimiento descrito según el enfoque de reducción de costos operativos.

### 8.1. Disminución de la cantidad de canales por enlace

La fuente de información para abordar este enfoque es el cuadro de características técnicas de la red proporcionado por la ANE. Como su nombre indica, contiene la descripción completa de la red de microondas de Tigo ante el MinTIC. El documento es entregado al operador en formato físico después de cada proceso de actualización de la red en el que participa. Para un manejo más eficiente y sencillo de la información el documento es posteriormente digitalizado en un libro de Microsoft Excel®. La información de interés para el desarrollo del enfoque es el ancho de banda contratado, la frecuencia de operación del canal y la cantidad de canales por enlace.

Partiendo del CCTR se realiza un inventario enfocado en la cantidad de redes<sup>12</sup> que tienen posibilidad de reducción de canales. Además se calcula el valor anual de

---

<sup>12</sup> Según la nomenclatura del MinTIC una red es el equivalente a un enlace microondas de transmisión y recepción.

contraprestación en función del tipo de las características de las redes. Este inventario se realiza en la misma plataforma de Microsoft Excel®.

Teniendo en cuenta que el objetivo es la reducción de costos de operación es necesario que la recanalización del espectro incurra en el menor o ninguno de los costos posibles que esto pueda provocar. Se requiere entonces que la propuesta de canalización del espectro coincida de forma exacta con los límites de la banda de operación y el shifter previos para los enlaces en una banda de operación menor a los 12 GHz, con el fin de evitar el costo del estudio de frecuencia<sup>13</sup> requerido por el MinTIC para la modificación de enlaces con esa característica. En el caso de los enlaces en una banda de operación mayor a los 12 GHz se tiene en cuenta una mayor flexibilidad para la selección y ubicación de los canales, pues no se requieren estudios de frecuencias para la modificación de redes de este tipo.

A continuación son definidos los componentes del problema de optimización:

- *Función objetivo:* Minimizar el costo de operación de la red de enlaces microondas de la red de transporte al reducir el número de canales utilizados por enlace.
- *Restricciones:*
  - o Mantener el ancho de banda total de cada una de las redes.
  - o Mantener la separación de frecuencia de transmisión y recepción para todos los enlaces.
  - o Mantener los límites totales del canal de operación previo para las redes en una banda de operación inferior a los 12 GHz.
  - o Permitir el movimiento de los límites de la banda de operación para los enlaces de 12 GHz, siempre y cuando este sea menor a los 14 MHz para evitar inconvenientes de interferencia con alguna otra red.
- *Variables de decisión:*
  - o Canales definidos en el CNABF.

Dado que es un problema de optimización con numerosas restricciones para cada uno de los casos, que son representados por cada uno de los enlaces existentes en la red de transporte de la compañía y además que se posee un fundamento académico suficiente sobre los requerimientos técnicos de la propuesta, se opta por

---

<sup>13</sup> Un estudio de frecuencia cuesta aproximadamente COP\$6.200.000,00 por enlace.

aplicar un algoritmo de búsqueda metaheurístico directamente en la plataforma Microsoft Excel®.

Es usada una metaheurística de búsqueda la cual se denomina local pues está definida por entornos en los cuales es posible encontrar una solución de acuerdo a las características iniciales de la situación. Los entornos usados están determinados por los siguientes criterios:

- La banda de operación, shifter y tabla del CNABF en la que se ubica el canal actual.
- Una de las 14 posibilidades de recanalización definidas en la Tabla 6 que son las únicas posibles, dados los anchos de banda determinados en el CNABF.
- La tabla de canalización de destino.

**Tabla 6 Posibilidades de recanalización según el número de canales original.**

<b>Opción</b>	<b>Número de canales previo</b>	<b>Número de canales propuesto</b>
1	2	1
2	3	1
3	4	1
4	4	2
5	6	1
6	6	2
7	6	3
8	8	1
9	8	2
10	8	4
11	16	1
12	16	2
13	16	4
14	16	8

**Fuente: Elaboración propia.**

La búsqueda se realiza en sentido exhaustivo y ordenado y se detiene una vez se encuentra una solución mejor que la situación inicial dentro de uno de los entornos definidos previamente, por lo que se denomina a la misma de tipo parcial sistemática. Por último, dado que no hay información directa sobre el valor de la función objetivo, pues nunca es evaluada y que la búsqueda solamente está

orientada a la estructura y características del entorno definido, se dice que es una búsqueda no informada.

El algoritmo implementado para la búsqueda de una configuración de un número menor de canales por enlace, sigue la lógica de una metaheurística de búsqueda local parcial sistemática no informada.

## 8.2. Reducción de ancho de banda en enlaces de última milla

La información pertinente para el enfoque de reducción de ancho de banda en los enlaces de última milla es: La capacidad del canal en función del ancho de banda y la modulación utilizada; la medición del throughput de la estación y la proyección de crecimiento de la red en cuanto a capacidad para los próximos cinco años.

Los datos técnicos de la capacidad del canal de acuerdo al ancho de banda y la modulación se encuentran disponibles en los manuales de usuario de los equipos. Para modelos específicos esta información es entregada a la compañía directamente por el proveedor. El área de calidad es la responsable del informe de throughput de la red por estación, éste informe no cubre la totalidad de los nodos pues no se tiene la capacidad de medición en todos ellos, sin embargo contiene la información del throughput de la estación y el de agregación<sup>14</sup>. La información de la proyección de throughput por estación es elaborada por el área de planeación de la red de transmisión que se presenta en dos archivos, uno sobre la proyección para 2017 y otro que contiene la proyección para los próximos cinco años en lo que se denomina Five Year Plan (FYP). Por último la información sobre las características configuradas en campo; como la modulación, es accesible a través de la herramienta para la administración de la red TesGestion®.

Se realiza un inventario del ancho de banda total de la red de acuerdo a la modulación utilizada en cada enlace, junto con el valor anual de contraprestación que representa cada uno de los mismos.

De forma análoga al enfoque anterior se define el problema de optimización:

- *Función objetivo:* Minimizar el costo de operación por enlace al reducir el ancho de banda utilizado.

---

<sup>14</sup> El throughput de agregación se refiere al indicador con respecto a la totalidad de la red, el de la estación se refiere únicamente a la transmisión desde el nodo analizado.

- *Restricciones:*
  - o La capacidad resultante de la configuración de ancho de banda y modulación propuesto debe ser mayor o igual a la proyección o medida de la cual se parte.
  - o Ninguna de las modulaciones puede superar al esquema de 512QAM en cuanto a número de símbolos, debido a las consideraciones de potencia que esto implica.
  - o El canal propuesto debe estar lo más cerca posible en frecuencia del canal original para evitar problemas de interferencia destructiva con algún otro radioenlace que se encuentre previamente implementado.
- *Variables de decisión:*
  - o Esquema de modulación.
  - o Canal del CNABF.

Se buscan cuatro propuestas de configuración para la reducción de los anchos de banda en los enlaces de última milla: De acuerdo al throughput medido que representa la mayor tasa de elementos que soporta el canal; según la proyección de crecimiento de capacidad requerida para el próximo año; para la máxima de las capacidades según la proyección de crecimiento del FYP; y para el máximo de las proyecciones por cada uno de los enlaces.

De nuevo se utiliza una metaheurística de búsqueda local parcial sistemática no informada, sin embargo en este caso se tiene en cuenta un enfoque de una metaheurística constructiva, pues se parte de la solución modular del problema. Los entornos en este caso están definidos por los siguientes criterios:

- El throughput definido para cada combinación de modulación y ancho de banda de uso en el CNABF.
- La banda de operación de la red.
- La tabla de canalización de destino.

Se aplica uno de los aspectos de la metaheurística modular al hallar en primera instancia la combinación ideal de ancho de banda y modulación y partir de allí para encontrar el canal definido en el CNABF que cumpla con el requerimiento del ancho de banda y la cercanía en frecuencia con el canal previamente implementado.

### 8.3. Gestión de la radicación

Tras construir las propuestas de reducción de costos de operación desde ambos enfoques se procede a la radicación de la solicitud de interés de la modificación de la red ante el MinTIC y la ANE. Con este fin se aplica un método para la gestión de recursos y tiempos en proyectos: El método de ruta crítica.

Partiendo de la experiencia en la participación en otros procesos de radicación de documentación y solicitudes al MinTIC, se escoge este método para administrar la ejecución total del proceso de creación de las propuestas y la radicación final de las mismas.

## 9. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

### 9.1. Recanalización para el uso óptimo del uso del espectro contratado

#### 9.1.1. Inventariado de la red orientado a la cantidad de canales por enlace con múltiples canales

Con el fin de calcular el impacto de la propuesta de recanalización en términos del costo operacional que ésta representa, se realiza un inventario de los enlaces contratados por Colombia Móvil S.A E.S.P. ante la ANE y el MinTIC.

A Septiembre de 2016 la red microondas de transmisión de Colombia Móvil S.A. E.S.P. cuenta con 4864 canales distribuidos según lo muestra la Tabla 7 en función de la banda de operación.

**Tabla 7. Inventario de enlaces por banda de operación.**

<b>Banda</b>	<b>Cantidad de canales</b>
1.4	-
4	12
U4	-
L6	43
U6	35
7	195
8	380
10	2
11	275
13	327
15	407
18	762
23	2,426
<b>Total</b>	<b>4,864</b>

**Fuente: Elaboración propia a partir de CCTR 24062.**

Hay 4864 canales definidos según el CNABF, contratados por la compañía que están distribuidos en 2600 radioenlaces. Estas redes o radioenlaces se distribuyen de acuerdo a la Tabla 8, según la cantidad de canales utilizados y la banda de frecuencia en la que operan.

Tabla 8. Distribución de redes en función del número de canales.

Número de canales	Banda											Cantidad de enlaces
	4	L6	U6	7	8	10	11	13	15	18	23	
1	2	35	30	30	275	-	173	131	399	414	348	1,837
2	2	4	1	35	88	1	30	40	4	2	1	208
3	2	-	1	-	-	-	12	-	-	-	-	15
4	-	-	-	4	2	-	-	29	-	86	321	442
6	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95	95
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>39</b>	<b>32</b>	<b>69</b>	<b>365</b>	<b>1</b>	<b>216</b>	<b>200</b>	<b>403</b>	<b>502</b>	<b>767</b>	<b>2,600</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de CCTR 24062.

De la Tabla 8, se concluye que de las 2600 redes contratadas, solamente 763 aplican para el proceso de recanalización, número que corresponde a la cantidad de enlaces con un número de canales mayor a uno. Éstos 763 enlaces representan el 29% del total de los enlaces de microondas de la red de transporte de la compañía.

En la Tabla 9 se indica el valor anual de contraprestación de acuerdo a la banda de operación y el número de canales por enlace, a partir de ésta se construye el gráfico de la Figura 5 en el que se ilustra el porcentaje de participación del V.A.C. total según el número de canales por enlace. Se nota claramente que el aporte de los enlaces con múltiples canales es mayor al 29% de participación de la cantidad total de radioenlaces de la red, en términos de valor de contraprestación anual, los enlaces con multiplicidad de canales suman alrededor del 36% del total de éste último.

**Tabla 9. Valor anual de contraprestación por banda de operación y número de canales por enlace.**

Banda de operación	Número de canales							V.A.C. [\$COP]
	1	2	3	4	6	8	16	
4	19,856,275	79,425,101	119,137,651	-	-	-	-	<b>218,419,027</b>
U6	560,195,164	49,640,688	36,485,906	-	-	-	-	<b>646,321,758</b>
L6	632,918,772	158,850,202	-	-	-	-	-	<b>791,768,974</b>
7	456,363,392	458,100,816	-	91,890,429	-	-	-	<b>1,006,354,637</b>
8	3,831,378,612	1,591,590,770	-	67,952,586	-	-	-	<b>5,490,921,969</b>
10	-	10,810,639	-	-	-	-	-	<b>10,810,639</b>
11	3,122,730,213	421,835,535	325,642,913	-	35,741,295	-	-	<b>3,905,949,957</b>
13	1,853,252,352	500,378,135	-	518,910,659	-	-	-	<b>2,872,541,146</b>
15	4,066,151,489	95,944,419	-	-	-	-	-	<b>4,162,095,907</b>
18	3,991,152,682	54,053,194	-	1,281,060,688	-	-	-	<b>5,326,266,564</b>
23	2,661,154,549	6,949,696	-	3,961,326,902	-	1,862,518,614	111,195,141	<b>8,603,144,903</b>
<b>Total</b>	<b>21,195,153,501</b>	<b>3,427,579,194</b>	<b>481,266,470</b>	<b>5,921,141,265</b>	<b>35,741,295</b>	<b>1,862,518,614</b>	<b>111,195,141</b>	<b>33,034,595,480</b>

Fuente: Elaboración propia a partir del CCTR 24062.

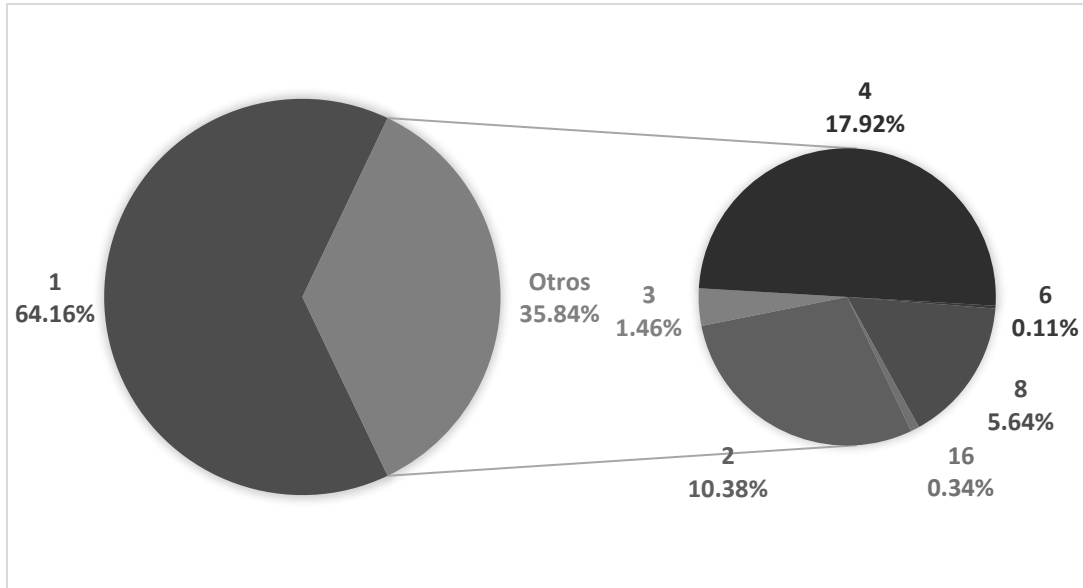


Figura 5 Aporte al V.A.C. según la cantidad de canales por enlace. Elaboración propia a partir del CCTR 24062.

### 9.1.2. Desarrollo del algoritmo de búsqueda de recanalización para la disminución del número de canales por enlace

A continuación se definen formalmente los componentes del problema de optimización.

#### *Función objetivo*

Minimizar el costo de operación de la red de enlaces microondas de la red de transporte al reducir el número de canales utilizados por enlace(n). (Ec. 1)

$$\text{Min: } \sum_1^n VAC (Bw_n, FreqOp_n)$$

Ec. 1

El costo de operación está definido por la función del valor anual de contraprestación que depende del ancho de banda del canal (Bw) y la frecuencia de operación (FreqOp) del mismo. (Ec. 2)

$$VAC(Bw, FreqOp) = FA \times FV \times SMLMV$$

Ec. 2

A mayor frecuencia de operación, menor es el coeficiente (FV) por el cual se multiplica el valor del salario mínimo legal mensual vigente (SMLMV) y a mayor ancho de banda, de mayor magnitud se hace el coeficiente asociado (FA). Ésta última relación no es de tipo lineal por lo que el resultado de la función VAC de dos canales de igual ancho de banda es más costoso que uno solo de un ancho de banda equivalente.

### *Restricciones*

- A) Mantener el ancho de banda total de cada una de las redes. (Ec. 3)<sup>15</sup>

$$Bw_n - Bw'_n = 0$$

**Ec. 3**

- B) Mantener la separación de frecuencia de transmisión y recepción para todos los enlaces. (Ec. 4)

$$Shifter_n - Shifter'_n = 0$$

**Ec. 4**

- C) Mantener los límites totales del canal de operación previo para las redes en una banda de operación inferior a los 12 GHz. (Ec. 5)
- D) Permitir el movimiento de los límites de la banda de operación (L) para los enlaces de 12 GHz, siempre y cuando este sea menor a los 14 MHz para evitar inconvenientes de interferencia con alguna otra red. (Ec. 5)

$$L(FreqOp_n) - L'(FreqOp_n) \begin{cases} = 0 : \forall FreqOp_n \leq 12 \text{ GHz} \\ < 14 \text{ MHz} : \forall FreqOp_n > 12 \text{ GHz} \end{cases}$$

**Ec. 5**

### *Variables de decisión*

Los canales de frecuencia definidos en el CNABF se distribuyen en tablas que comparten características específicas; a saber: Banda de operación, ancho de banda y shifter. Además los canales están ordenados ascendentemente dentro de las tablas y se componen a su vez de una par de frecuencias centrales (Una para

---

<sup>15</sup> La comilla simple (') indica el estado futuro o propuesto de la variable.

transmisión y otra para recepción). Así pues la totalidad de canales existentes y definido en el CNABF conforman el universo de soluciones posibles para la recanalización de los enlaces de la red de transporte de Tigo, las tablas de canalización son; en términos de la metaheurística, entornos de búsqueda, que están definidos como se mencionó anteriormente por la Banda de operación, ancho de banda y separación de frecuencias dúplex o shifter.

### Algoritmo

A continuación es expuesta la lógica aplicada para la búsqueda por entornos descrita previamente en formato de pseudocódigo. En la Tabla 10 son definidos algunos de los componentes utilizados en el pseudocódigo.

```

1: Algoritmo: BusquedaDeCanalizacion (NumeroDeCanales[N], Frecuencias[N], AnchoDeBanda[N], Shifter[N]);
2: n ← 1;
3: Mientras n<=N Hacer {
4:   Ch ← NumeroDeCanales(n);
5:   Si Ch <= 1 Entonces {
6:     n ← n+1;
7:     Volver a →|2:|;
8:   } SiNo Entonces {
9:     p ← 1;
10:    Freq[2] ← Frecuencias(n);
11:    FreqP ← Promedio (Freq[2]);
12:    Bw ← AnchoDeBanda(n);
13:    Sh ← Shifter(n);
14:    Banda ← DeterminarBandaOperacion (Freq[2]);
15:    TablaO ← DeterminarTabCNABF (Banda, Bw, Freq[2]);
16:    Mientras p <= P Hacer {
17:      TabProp(p) ← FindTabDestino (Banda, Bw, Ch, TablaO);
18:      Si Sumatoria (TabProp[P]) > 0 Entonces {
19:        CanalProp(p) ← FindCanal(Freq[2], TabProp(p), Banda);
20:      } SiNo Entonces{
21:        Escribir 0;
22:      }
23:      Escribir TabProp(p), CanalProp(p);
24:      p ← p+1;
25:    }
26:  }
27: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: DeterminarBandaOperacion (Freq[]);
2: b ← 1;
3: Mientras b <= B Hacer {
4:   Si FreqC >= LimitesInferiores(b) Entonces {
5:     b ← b+1;
6:     Volver a →|3:|;

```

```

7:           } SiNo Entonces{
8:             BandaO ← Bandas(b);
9:           }
10:        }
11:  Escribir BandaO;
12: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: DeterminarTabCNABF (Banda, Bw, Freq[ ]);
2: t ← 1;
3: TabO ← 0;
4: Mientras t <= T Hacer {
5:   Si Banda&Bw&FreqC = BandaCNABF(t)&BwCNABF(t)&FrecChCNABF(t) Entonces {
6:     TabO ← TablaCNABF(t);
7:   } SiNo Entonces {
8:     t ← t+1;
9:   }
10: }
11: Escribir TablaO;
12: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: FindTabDestino (Banda, Bw, Ch, TablaO);
2: d ← 1;
3: Mientras d <= D Hacer {
4:   Si Banda&Bw&Ch&TablaO = BandaProp(d)&BwProp(d)&ChProp(d)&TablaOProp(d) Entonces {
5:     TabProp(d,p) ← TablaPropuesta(d);
6:   } SiNo Entonces {
7:     d ← d+1;
8:   }
9: }
10: Escribir TabProp(d,p);
11: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: FindCanal (Freq[ ], TabProp(p), Banda);
2: c ← 1;
3: Mientras c <= C Hacer {
4:   Si Banda <= 12 Entonces {
5:     Si TabProp(p)&FreqC = TablaCNABF(c)&FrecChCNABF(c) Entonces {
6:       CanalProp(p) ← CanalCNABF(c);
7:     } SiNo Entonces {
8:       Si (TabProp(p) = TablaCNABF) Y (FreqC-FreqChCNABF <= 14) Entonces {
9:         CanalProp(p) ← CanalCNABF(c);
10:      } SiNo Entonces {
11:        c ← c+1;
12:      }
13:    }
14:  Escribir CanalProp(p);
15:  FinAlgoritmo;

```

**Tabla 10. Convención sobre el pseudocódigo para la reducción de número de canales de los enlaces de la red de transporte.**

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
n	Contador de red
N	Número total de redes
p	Contador para propuesta
P	Número total de propuestas
b	Contador para rangos de banda
B	Número total de bandas
t	Contador de tablas del CNABF
T	Número total de tablas del CNABF
d	Contador de tablas de propuestas de cambio
D	Número total de tablas de propuestas de cambio
c	Contador del número de canales por tabla
C	Total del número de canales por tabla
[ ]	Denota la cualidad de vector de una variable
&	Indica concatenación de variables
	Refiere una línea numerada del código
←	Guardar un valor en una variable

## 9.2. Valoración y ajuste del ancho de banda para enlaces de última milla

### 9.2.1. Inventariado de la red enfocado al ancho de banda de los enlaces de última milla

Con un propósito similar al del inventariado de la primera parte, se realiza un inventario de los enlaces de la red de transporte de Tigo, enfocado en el ancho de banda que utilizan los enlaces, para de esta manera determinar la viabilidad de una reducción en los mismos tras analizar el throughput por nodo y las proyecciones de crecimiento en capacidad de los enlaces para los próximos cinco años.

El proceso de reducción de anchos de banda se realiza únicamente sobre estaciones de última milla debido a que son puntas finales de la red que tienen solo un enlace sobre el cual transmitir. En éste sentido el primer paso es determinar la cantidad de nodos o estaciones que son clasificadas como estaciones de punta.

A Octubre de 2016 la red de transporte de TigoUne cuenta con 2349 radioenlaces, sin procesos de modificación o cancelación, de los cuales el 58% son de última

milla, exactamente 1363 son enlaces de punta. Estos enlaces se distribuyen de acuerdo a los anchos de banda definidos en el CNABF según la Tabla 11.

**Tabla 11. Distribución de enlaces según el ancho de banda total y el tipo de enlace.**

Ancho de banda [MHz]	Tipo de enlace		Cantidad de enlaces
	Ruta	Última milla	
3.5	77	328	405
7	33	68	101
10	31	10	41
13.75	42	206	248
14	145	264	409
20	29	10	39
27.5	75	100	175
28	357	324	681
29	5	-	5
29.65	127	30	157
30	7	-	7
40	98	53	151
55	11	2	13
56	2	-	2
<b>Total general</b>	<b>1,039</b>	<b>1,395</b>	<b>2,434</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del aplicativo TesGestion®.

El ancho de banda total de la red es de 57.11GHz; 28.35GHz corresponden al ancho de banda de los enlaces de última milla que corresponden al 49.6% del total del ancho de banda contratado por TigoUne. En la Tabla 12 se encuentra la distribución del ancho de banda de la red según el tipo de enlace y la magnitud de los anchos de banda usados en el CNABF.

**Tabla 12. Distribución del ancho de banda de la red de acuerdo al tipo de enlace y a la magnitud de los ancho de banda usados en el CNABF**

Anchos de banda del CNABF [MHz]	Tipo de enlace		Ancho de banda total [MHz]
	Ruta	Última milla	
3.5	1,431.5	5,050.5	6,482
7	462	868	1,330
10	690	200	890
13.75	550	2,887.5	3,437.5
14	3,052	3,934	6,986
20	540	200	740

Anchos de banda del CNABF [MHz]	Tipo de enlace		Ancho de banda total [MHz]
	Ruta	Última milla	
27.5	2,145	2,777.5	4,922.5
28	10,360	8,988	19,348
29	319	-	319
29.65	4,240	1,097.1	5,337
30	150	-	150
40	4,160	2,240	6,400
55	550	110	660
56	112	-	112
<b>Total general</b>	<b>28,761.5</b>	<b>28,352.6</b>	<b>57,114</b>

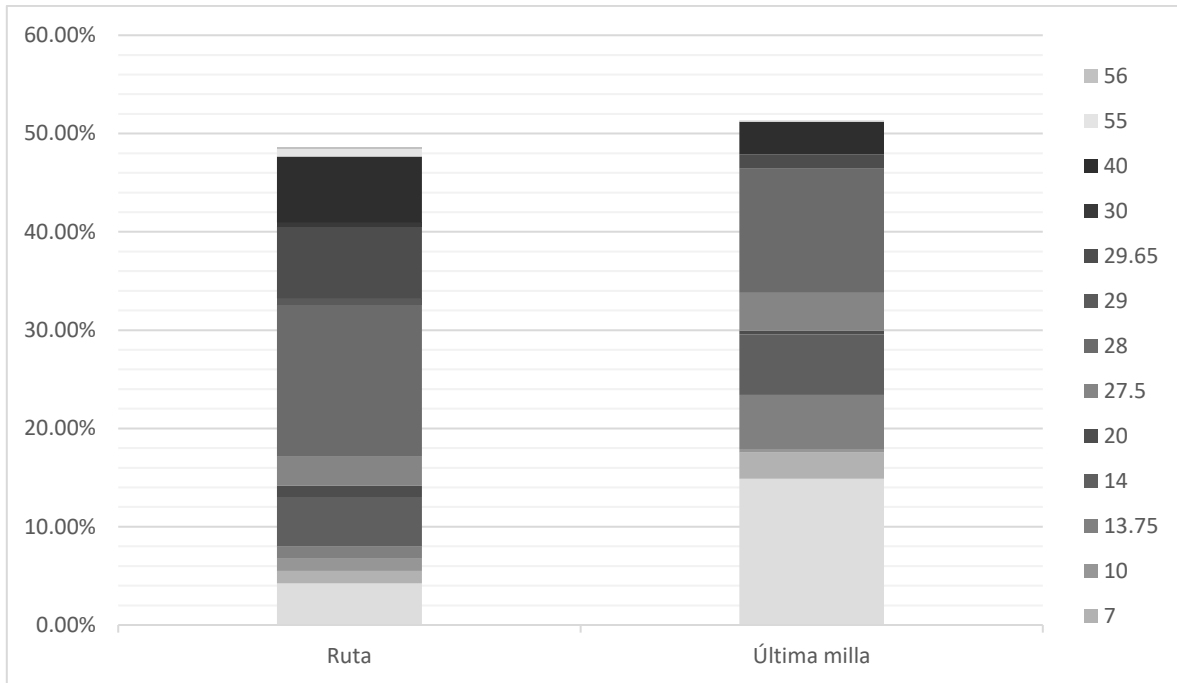
Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del aplicativo TesGestion®.

La Tabla 13 muestra la distribución del valor anual de contraprestación por uso del espectro radioeléctrico diferenciada por el tipo de enlace y el ancho de banda de los canales definidos por el CNABF. El valor por el uso del espectro de los enlaces de punta representa el 51.36% del total del valor anual de contraprestación de los enlaces de la red transporte sin procesos de modificación o eliminación. Esta relación se ilustra en la Figura 6.

Tabla 13. Distribución del V.A.C. según el tipo de enlace y los anchos de banda utilizados en el CNABF.

Anchos de banda del CNABF [MHz]	Tipo de enlace		V.A.C. [COP\$]
	Ruta	Última milla	
3.5	1,481,140,239.12	5,224,958,193.60	<b>6,706,098,432.72</b>
7	444,435,837.48	928,639,381.68	<b>1,373,075,219.16</b>
10	440,588,684.16	131,051,416.32	<b>571,640,100.48</b>
13.75	429,212,693.16	1,926,279,319.68	<b>2,355,492,012.84</b>
14	1,770,779,864.52	2,165,533,646.76	<b>3,936,313,511.28</b>
20	411,797,085.12	133,809,232.32	<b>545,606,317.44</b>
27.5	1,057,512,123.36	1,353,260,311.20	<b>2,410,772,434.56</b>
28	5,414,861,403.36	4,427,108,235.72	<b>9,841,969,639.08</b>
29	218,419,027.20	-	<b>218,419,027.20</b>
29.65	2,554,895,898.72	512,181,587.52	<b>3,067,077,486.24</b>
30	154,161,914.40	-	<b>154,161,914.40</b>
40	2,344,695,163.20	1,169,313,984.00	<b>3,514,009,147.20</b>
55	297,292,564.80	54,053,193.60	<b>351,345,758.40</b>
56	50,192,251.20	-	<b>50,192,251.20</b>
<b>Total general</b>	<b>17,069,984,749.80</b>	<b>18,026,188,502.40</b>	<b>35,096,173,252.20</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del aplicativo TesGestion®.



**Figura 6. Distribución porcentual del V.A.C. según el tipo de enlace y los anchos de banda definidos en el CNABF. Elaboración propia a partir de la base de datos del aplicativo TesGestión.**

### 9.2.2. Desarrollo del algoritmo para la búsqueda de configuración del canal para la reducción del ancho de banda en los enlaces de punta

Se presenta a continuación el planteamiento formal del problema de optimización.

#### *Función objetivo*

Minimizar el costo de operación por enlace (n) al reducir el ancho de banda utilizado.  
(Ec.1)

$$Min: \sum_1^n VAC (Bw_n, FreqOp_n)$$

La función por la que se define el valor anual de contraprestación (VAC) depende del ancho de banda del canal (Bw) y la frecuencia a la cual éste opera (FreqOp).  
(Ec. 2)

$$VAC(Bw, FreqOp) = FA \times FV \times SMLMV$$

El coeficiente asociado a la frecuencia de operación (FV) se reduce en cuanto la frecuencia es mayor, mientras el factor asociado al ancho de banda incrementa en tanto el ancho de banda aumenta (FA). Ambos coeficientes son multiplicados por el valor de salario mínimo legal mensual vigente (SMLMV). Dada la relación directa entre el factor del ancho de banda y el valor anual de contraprestación, se reducirá en la misma medida que lo haga el ancho de banda del enlace en cuestión.

### *Restricciones*

- A) La capacidad (Cap) resultante de la configuración de ancho de banda y modulación (Mod) propuesto debe ser mayor o igual a la proyección o medida de la cual se parte. (Ec. 6)

$$Cap'(Mod_n, Bw_n) > Cap(Mod_n, Bw_n)$$

Ec. 6

- B) Ninguna de las modulaciones puede superar al esquema de 512QAM en cuanto a número de símbolos (Bit), debido a las consideraciones de potencia que esto implica. (Ec. 7)

$$Bit'(Mod_n) \leq 9$$

Ec. 7

- C) El canal propuesto (Canal) debe estar lo más cerca posible en frecuencia del canal original para evitar problemas de interferencia destructiva con algún otro radioenlace que se encuentre previamente implementado. (Ec. 8)

$$|FreqOp'(Canal_n) - FreqOp(Canal_n)| \cong 0$$

Ec. 8

### *Variables de decisión*

La configuración escogida para la reducción de anchos de banda depende del esquema de modulación y canal del CNABF escogido. La combinación de las dos variables compone la capacidad del enlace en cuestión. Para las cuatro configuraciones buscadas según la fuente de información es necesario que la capacidad obtenida sea mayor que la proyección o dato de referencia. Tras

determinar las combinaciones se procede a buscar un canal definido por el CNABF que cumpla con el ancho de banda y que comparta una banda de operación similar.

Para determinar la configuración óptima del radio para la solución encontrada se parte de un índice en función del ancho de banda, modulación y capacidad pronosticada por el fabricante. Dicho índice pondera los valores según la importancia que tiene cada uno para la selección de la configuración completa, es por esto que el valor de dicho índice se calcula según la Ec. 9, en donde el cuadrado del ancho de banda es el de mayor peso, seguido de la cantidad de símbolos de la modulación y la millonésima parte de la capacidad presupuestada.

$$I_{conf} = Bw^2 + 2^{Bits} + \frac{Capacidad}{1,000,000}$$

Ec. 9

Las tablas del CNABF, como en el enfoque anterior, son los entornos definidos dentro del universo de posibles soluciones; de las cuales únicamente son factibles aquellas para las cuales se halle una combinación con un ancho de banda que coincida con alguno de los determinados en el CNABF dentro de las tablas, según la banda de operación. Se tiene en cuenta además que para la determinación de los entornos de este enfoque no es necesario tomar en consideración el shifter; únicamente el ancho de banda y la frecuencia de operación

### Algoritmo

A continuación es expuesta la lógica utilizada para hallar los canales definidos por el CNABF que cumplan con la mejor configuración de modulación y ancho de banda encontrada para los cuatro escenarios de aplicación. El formato utilizado es pseudocódigo y en la Tabla 14 se encuentran algunas convenciones al respecto del mismo.

<pre> 1: Algoritmo: <b>BusquedaConfiguracionModBW</b> (CodigoEstacion[N], NumeroDeCanales[N], Frecuencias[N],   AnchoDeBanda[N], Equipo [N], Datos[Throughput[N], Capacidad17[N], CapacidadFYP[N]]); 2: n ← 1; 3: Mientras n &lt;= N Hacer { 4:   s ← 1; 5:   CodEst ← CodigoEstacion(n); 6:   Ch ← NumeroDeCanales(n); 7:   Freq[2] ← Frecuencias(n); 8:   Bw ← AnchoDeBanda(n); 9:   Thrpt ← Throughput(n); 10:  Cap17 ← Capacidad17(n); </pre>
---

```

11:   CapFYP ← CapacidadFYP(n);
12:   FreqInd ← IndiceDeFrecuencia(Freq[2]);
13:   Mientras s <= 3 Hacer {
14:       RadioConfig[3](c,s,n) ← DeterminarConf(Equipo, Datos(s,n));
15:       TablaCanal[2](s,n) ← FindTabChCNABF(RadioConfig[3](c,s,n),FreqInd);
16:       s ← s+1;
17:   }
18:   RadioConfig[3](c,4,n) ← MaxCap (RadioConfig[3](c,2,n), RadioConfig[3](c,3,n));
19:   s ← 1;
20:   Mientras s <= 4 Hacer {
21:       Si VAC(s,n) = 0 Entonces {
22:           VAC(s,n) ← VAC(1,n);
23:       } SiNo Entonces {
24:           VAC(s,n) ← CalcularVAC(Freq[2], TablaCanal[2](s,n));
25:       }
26:       Escribir VAC(s,n);
27:       s ← s+1;
28:   }
29: }
30: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: IndiceDeFrecuencia (Freq[2]);
2: FreqInd ← Raiz(ValorAbsoluto((Freq(1)^2) - (Freq(2)^2));
3: Escribir FreqInd;
4: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: DeterminarConf(Equipo, Datos(s,n));
2: c ← 1;
3: Mientras c<=C Hacer {
4:     RangoViableIndConf[ ] := (Equipo = EquipoConf(c)) Y (CapacidadConf(c) <= Datos(s,n));
5:     RadioConf[3](c,s,n) ← Minimo(RangoViableIndConf[ ]);
6:     } SiNo Entonces {
7:         RadioConf[3](c,s,n) ← 0;
8:     }
9:     Escribir RadioConf[3](c,s,n);
10: }
11: FinAlgoritmo;

```

```

1: Algoritmo: FindTabChCNABF (RadioConfig[3](s,n),FreqInd);
2: f ← 1;
3: Mientras f<=F Hacer {
4:     FreqCNABF(f) ← Minimo(ValorAbsoluto(FreqInd-FreqCNABF[F]));
5:     Si RadioConf(AnchoDeBanda)(s,n) = AnchoDeBandaCNABF(f) Entonces {
6:         TablaCanal(1)(s,n) ← TablaCNABF(f):=FreqCNABF(f);
7:         TablaCanal(2)(s,n) ← CanalCNABF(f):=FreqCNABF(f);
8:     } SiNo Entonces {
9:         Tabla(s,n) ← 0;
10:    }
11:    Escribir TablaCanal[2](s,n);
12: }

```

13: FinAlgoritmo;

1: Algoritmo: **MaxCap** (RadioConfig[3](c,2,n), RadioConfig[3](c,3,n));  
2: RadioConfig[3]((Cap),1,n) ← Maximo(RadioConfig[3]((Cap),2,n), RadioConfig[3]((Cap),3,n));  
3: Escribir RadioConfig[3]((Cap),1,n);  
4: FinAlgoritmo;

5: Algoritmo: **CalcularVAC** (Freq[2], RadioConfig[3](c,s,n));  
6: VAC(s,n) ← FactorAnchoDeBanda(RadioConfig[3]((Bw),s,n))\*FactorFrecuencia(Promedio(Freq[2])\*SMLMV);  
7: Escribir VAC(s,n);  
8: FinAlgoritmo;

**Tabla 14. Convenciones del pseudocódigo para reducción de anchos de banda en enlaces de última milla.**

Elemento	Descripción
n	Contador de red
N	Número total de redes
s	Contador de escenario
c	Contador de configuración de radio
C	Total de configuraciones de radio
f	Contador de tabla y canal del CNABF
F	Número total tablas y canales del CNABF
[ ]	Denota la cualidad de vector de una variable
&	Indica concatenación de variables
	Refiere una línea numerada del código
←	Guardar un valor en una variable
:=	“Tal que”

### 9.3. Gestión para la radicación de las modificaciones ante el MinTIC y la ANE

A partir de la experiencia obtenida en otros trámites para la radicación de documentación de solicitudes de interés y procesos de selección objetiva ante el MinTIC y la ANE, realizados en paralelo durante el desarrollo de la práctica, se definen las actividades y la duración de las mismas en la Tabla 15.

**Tabla 15. Numeración de actividades para la radicación de las modificaciones a la red a partir de los resultados obtenidos en las dos primeras partes del proyecto.**

<b>ID Actividad</b>	<b>Nombre de tarea</b>	<b>Duración [días]</b>	<b>ID Actividad previa</b>
1	Recolección de la información para el desarrollo de la primera parte del proyecto.	3	-
2	Ordenamiento y análisis de la información para el desarrollo del primer componente.	2	1
3	Inventariado de la red orientado a la cantidad de canales por enlace.	3	2
4	Planeación del desarrollo del algoritmo para la reducción de canales por enlace.	5	3
5	Desarrollo del algoritmo para la reducción de canales por enlace.	18	4
6	Análisis de los resultados arrojados por el algoritmo de reducción de canales.	3	5
7	Ajuste al algoritmo para reducción de canales según recomendaciones.	2	6
8	Presentación y aprobación de resultados del primer componente.	2	7
9	Recolección de la información base para el desarrollo de la segunda parte del proyecto.	5	-*
10	Ordenamiento y análisis de la información para el desarrollo del segundo componente.	3	9
11	Inventariado de la red orientado al ancho de banda por enlace.	3	10
12	Planeación de estrategia para abordar el segundo algoritmo.	5	11
13	Desarrollo del algoritmo para la reducción de anchos de banda de enlaces de última milla.	13	12
14	Revisión de los resultados arrojados por el algoritmo para reducción de anchos de banda.	3	13
15	Ajuste al algoritmo para reducción de anchos de banda según recomendaciones.	2	14
16	Presentación y aprobación de resultados del segundo componente.	2	15
17	Preparación de la documentación a radicar.	7	8;16
18	Revisión de la documentación a radicar.	4	17
19	Impresión de documentos y preparación de los CDs y formatos.	2	18
20	Radicación de la documentación como solicitud de interés ante el MinTIC.	1	19
<b>Total mínimo</b>		<b>72 días hábiles</b> <b>14 semanas</b> <b>3.6 meses</b>	

**\*A pesar que no hay una relación de precedencia, la actividad debe comenzar su ejecución a mediados de la Actividad 5.**

A partir de la información de la Tabla 15 se elabora el diagrama de red de precedencias de la Figura 7, en el cual se resalta la ruta crítica de actividades.

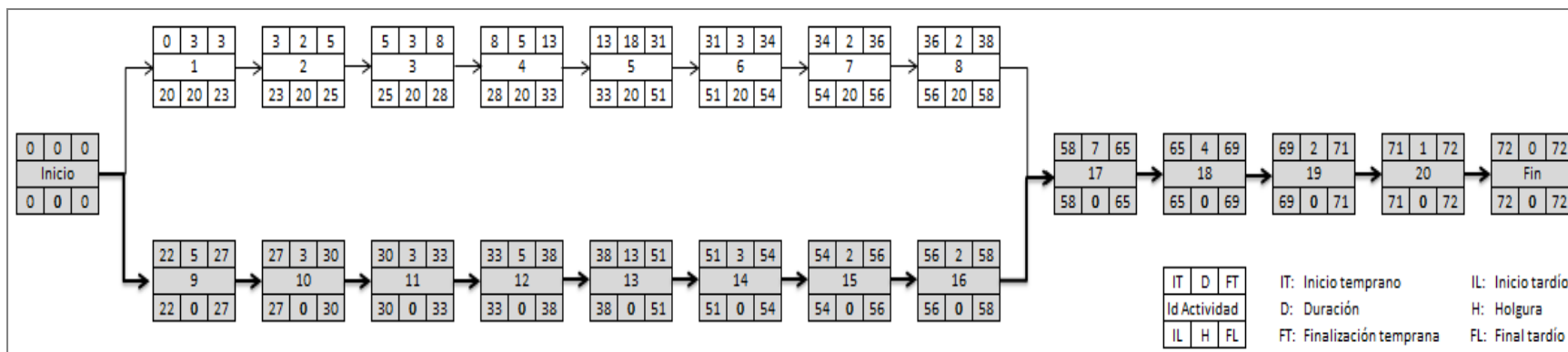


Figura 7. Red de precedencias para el proceso de radicación de modificaciones de la red de transporte.

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1. Recanalización para el uso óptimo del espectro contratado

El algoritmo para la reducción de canales por enlace encontró 36 propuestas de recanalización para 34 redes. En los casos en que la red tenía más de una propuesta de recanalización se seleccionó la que generaría la mayor reducción del valor anual de contraprestación. Para principios de Octubre, 21 de estas redes ya habían sido modificadas y fueron radicadas como parte del octavo proceso de selección objetiva de 2016, 4 de las redes fueron eliminadas, quedando pendiente la modificación de 13 redes.

Tras aplicar la totalidad de la propuesta de recanalización el VAC asociado a la operación de las 35 redes pasa de COP \$566,786,344 a COP \$357,909,360, obteniendo un ahorro total de COP \$208,876,984. Esta relación de costos se ve en detalle en la Tabla 16 y la Figura 8

Tabla 16. Detalle de la reducción del Valor anual de contraprestación por red.

Estado/Red	VAC Original [COP]	VAC Propuesta [COP]	Ahorro [COP]
<b>Cambio</b>	<b>183,780,858</b>	<b>138,414,785</b>	<b>45,366,073</b>
367	12,161,969	9,555,832	2,606,136
513	12,161,969	9,555,832	2,606,136
1033	12,161,969	9,555,832	2,606,136
2783	14,864,628	7,432,314	7,432,314
2996	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3193	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3202	24,323,937	17,374,241	6,949,696
3228	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3474	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3525	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3594	10,810,639	8,494,073	2,316,565
3884	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3961	12,161,969	9,555,832	2,606,136
3988	12,161,969	9,555,832	2,606,136
<b>Modificado</b>	<b>383,005,486</b>	<b>219,494,575</b>	<b>163,510,911</b>
1293	18,532,524	10,810,639	7,721,885
1318	27,026,597	13,513,298	13,513,298
1377	27,026,597	13,513,298	13,513,298
1441	18,532,524	10,810,639	7,721,885

Estado/Red	VAC Original [COP]	VAC Propuesta [COP]	Ahorro [COP]
1624	18,532,524	10,810,639	7,721,885
1652	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2340	16,215,958	7,432,314	8,783,644
2690	16,215,958	7,432,314	8,783,644
2802	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2807	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2808	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2810	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2819	18,532,524	10,810,639	7,721,885
2920	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3000	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3156	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3176	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3182	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3328	18,532,524	10,810,639	7,721,885
3407	18,532,524	15,443,770	3,088,754
<b>Total general</b>	<b>566,786,344</b>	<b>357,909,360</b>	<b>208,876,984</b>

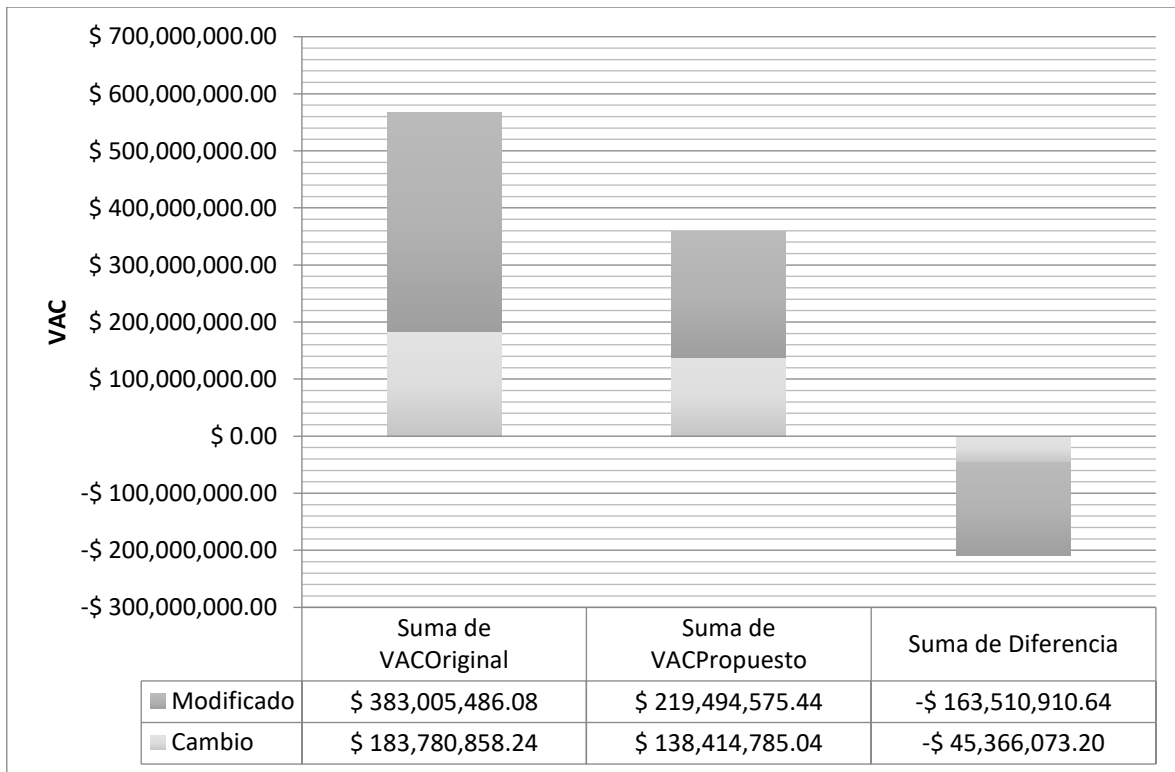


Figura 8. Comparación del valor anual de contraprestación original y propuesto según el estado del enlace, junto al valor total de ahorro de los mismos.

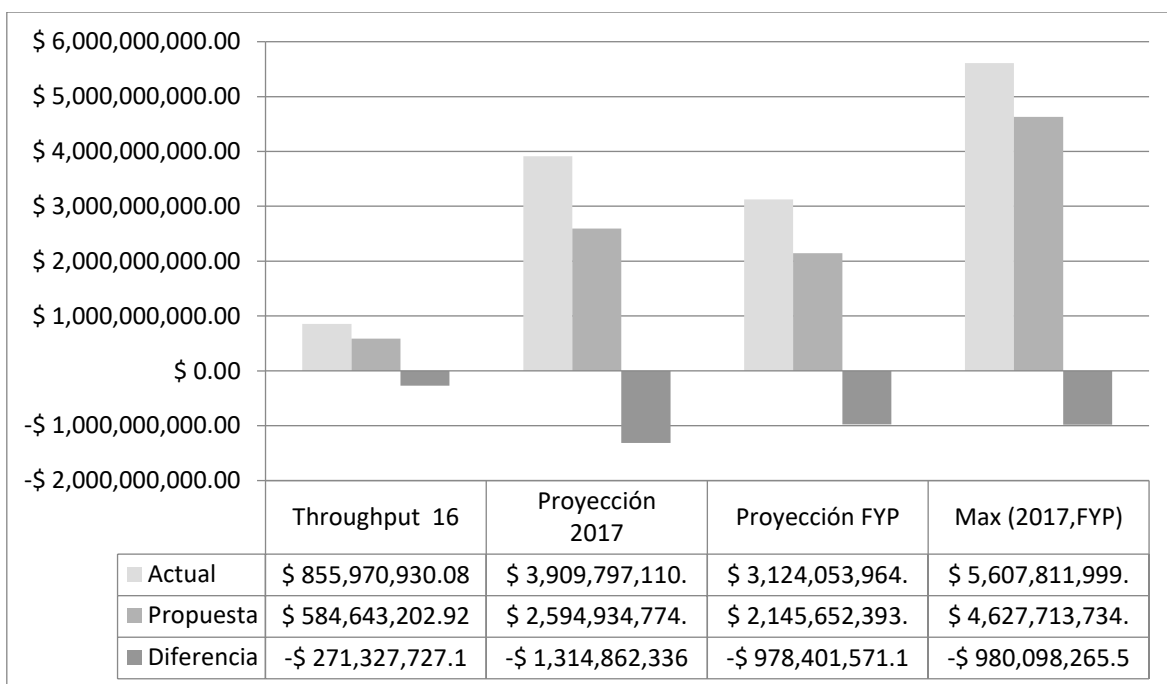
## 10.2. Valoración y ajuste de ancho de banda para enlaces de última milla

Los siguientes son los resultados obtenidos para los enlaces, a los cuales fue posible reducirles el ancho de banda en por lo menos uno de los escenarios planteados. Este conjunto de enlaces contiene 495 elementos; 68 enlaces con propuesta de reducción para el escenario referente al throughput medido en Octubre de 2016; 331 para la proyección de la capacidad de las estaciones para el año próximo, 276 enlaces para el máximo de las proyecciones anuales del Five Year Plan y 482 radioenlaces para la máxima proyección de capacidad entre el segundo y tercer escenario.

Se hace la comparación del valor anual de contraprestación para cada uno de los escenarios en la Tabla 17 como lo muestra la Figura 9, de la misma forma se compara el ancho de banda total de la red en la Tabla 18 correspondiente a la Figura 10.

**Tabla 17. Valor anual de contraprestación por propuesta y escenario.**

Escenario	Valor anual de contraprestación [COP\$]			Porcentaje del Actual
	Actual	Propuesta	Diferencia	
Throughput 16	855,970,930	584,643,203	271,327,727	<b>68.30%</b>
Proyección 2017	3,909,797,110	2,594,934,774	1,314,862,336	<b>66.37%</b>
Proyección FYP	3,124,053,965	2,145,652,394	978,401,571	<b>68.68%</b>
Max (2017,FYP)	5,607,812,000	4,627,713,734	980,098,266	<b>82.52%</b>



**Figura 9. Valor anual de contraprestación actual y propuesto por escenario.**

**Tabla 18. Ancho de banda total por propuesta y escenario**

Escenario	Ancho de banda total de la red [MHz]			Porcentaje del actual
	Actual	Propuesta	Diferencia	
Throughput 16	1,488	1,042	446	<b>70.04%</b>
Proyección 2017	6,823	4,214	2,609	<b>61.76%</b>
Proyección FYP	5,892	2,016	3,876	<b>34.21%</b>
Max (2017,FYP)	10,061	7,288	2,774	<b>72.43%</b>

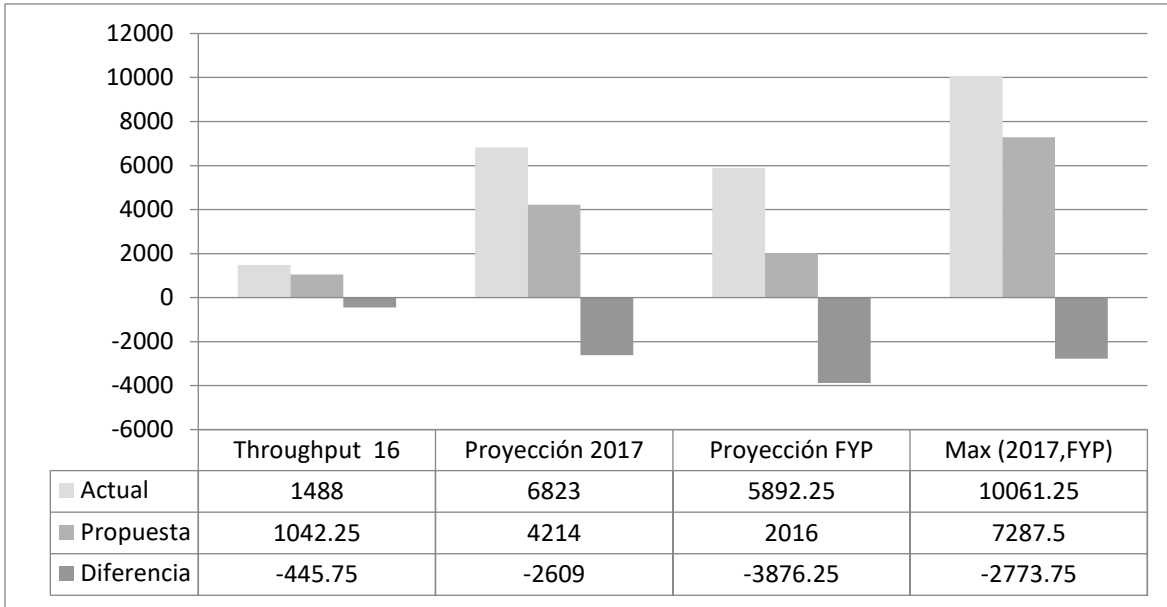


Figura 10. Ancho de banda total de la red actual y propuesto por escenario.

### 10.3. Gestión para la radicación de las modificaciones ante el MinTIC y la ANE

La ruta de actividades para la radicación de la documentación por modificación de las redes en ambos casos es lineal, solamente hay una actividad que tiene dependencia de la finalización de otras dos tareas. En este caso la ruta crítica sigue el cumplimiento de la línea de tareas asociadas a la reducción de anchos de banda para enlaces de última milla, pues al iniciar a la mitad del desarrollo del algoritmo para la disminución de canales, marca la tendencia para las holguras nulas.

La ejecución del proyecto inició en la segunda semana de Agosto. Según el diagrama de red de precedencias y teniendo en cuenta los 4 días festivos no laborables en este periodo, los 72 días hábiles se cumplirían el martes 29 de Noviembre. Sin embargo como se menciona en la sección de análisis de resultados de la primera parte del proyecto, en el mes de Octubre se presentó la documentación para el proceso de selección objetiva número ocho del 2016, en la que fueron incluidos algunos de los cambios de canalización arrojados por el algoritmo en las primera versiones o ejecuciones del mismo, lo que ocasionó entre otros factores; que se explican a continuación, el aplazamiento de la radicación de la documentación al MinTIC y la ANE.

Los otros factores que contribuyeron al aplazamiento de la fecha de presentación de la documentación fueron la radicación de solicitud de interés del mes de Septiembre, lo que ocasionó un desfase del cronograma de alrededor de 2 semanas, y la adquisición de la información de entrada del algoritmo para la reducción de ancho de banda de enlaces de última milla, por la ausencia del responsable del reporte de throughput en el área de calidad. Por las razones anteriores es que para la última semana de Noviembre aún se encuentra pendiente la revisión de los resultados arrojados por el segundo algoritmo. Sin embargo las modificaciones generadas a partir de la reducción de canales por enlace ya están incluidas en la preparación de la solicitud de interés próxima a radicar.

Dado que la solicitud de interés es un proceso sin fechas límites y que expresa precisamente el interés del operador en el uso de una porción del espectro para un enlace en específico, el aplazamiento de la fecha de radicación no afecta económicamente a la compañía ya que en el mes restante del presente año no se realizan más procesos de selección objetiva, procedimientos por los cuales se adjudican y ratifican las frecuencias de operación de los radioenlaces. Siendo de esta manera la radicación de la documentación sería realizada en la primera mitad del mes de Diciembre.

## 11. CONCLUSIONES

La aplicación de algoritmos de metaheurística resulta bastante útil en problemas de cualquier índole, dada la flexibilidad en cuanto a los componentes que conforman el problema de optimización. Para el desarrollo de este proyecto la guía de las estrategias de búsqueda por entornos facilitó la definición y resolución del problema basándose en los recursos disponibles y las características de las variables que componían el problema. Además fue posible comprobar que en cuanto a la experiencia y confianza sobre el foco de aplicación del método, los resultados son obtenidos con mayor rapidez, como ocurrió en el desarrollo del segundo algoritmo para el que se tenía la experiencia previa con la ejecución de la primera fase del proyecto. El desarrollo de los algoritmos permitió encontrar en un tiempo mucho menor los resultados planteados para cada enfoque, una tarea que de ser realizada de forma manual tomaría por lo menos de 5 a 10 minutos por enlace mientras que el cálculo y evaluación de todas las posibilidades de soluciones para cada una de las redes en ambos casos tomó aproximadamente 40 segundos.

Por otra parte y en referencia a la estrategia para la gestión del proyecto, el método de ruta crítica no resultó ser la mejor opción por dos razones: Es un método determinístico que usualmente se aplica sobre proyectos en los cuales se tiene experiencia previa total sobre las actividades a desarrollar. Para la gestión de la radicación se tenía experiencia en algunas de las actividades implicadas, sin embargo en el desarrollo de los algoritmos y en la adquisición de la información base para la ejecución de los mismos, hubo complicaciones y tardanzas de las cuales no se tenía certeza de ocurrencia. Y en segundo lugar no se tuvieron en cuenta procesos adicionales o paralelos en los cuales se invirtió tiempo que resultó en el aplazamiento de la radicación de la solicitud de interés. Sin embargo el desfase de tiempo para la entrega de la documentación solo fue del 8%, del planeado, es decir 6 días.

La construcción de los inventarios permitió hacer una comparación fiable entre los resultados obtenidos y el estado actual de la red. Fueron una herramienta de gran utilidad para el cierre del proyecto además de dar una vista más amplia sobre algunos de los aspectos de la red. Por ejemplo, el hecho de que la cantidad de enlaces con características específicas como la multiplicidad de canales o diversidad de frecuencias, no tiene la misma representación en el total del valor anual de contraprestación (35%) que en la composición de la red (29%).

Los resultados obtenidos por el algoritmo diseñado para la reducción de canales fueron pocos en relación con el tamaño de la red, representados por el 0.014% de los enlaces con propuestas de recanalización. Esto fue causado por dos razones: La primera y principal es la composición del CNABF, ya que la coincidencia exacta de frecuencias centrales de banda y ancho de banda no son comunes y prácticamente inexistentes. En segundo lugar más de la mitad de los radioenlaces de la red de transporte de la compañía no tienen diversidades de frecuencia, por lo que no aplicaban para este procedimiento. Para obtener una mayor flexibilidad y cantidad de canalizaciones para la reducción de canales por enlace, sería aconsejable suprimir la restricción de coincidencia del shifter. De esta manera más tablas resultarían candidatas para la recanalización y aunque el cambio de shifter implicaría un gasto por el cambio de ODU, valdría la pena revisar y evaluar a futuro si la inversión se refleja en una reducción mayor de costos por operación del enlace.

Sobre el segundo algoritmo cabe resaltar el uso de índices de configuración del radio, pues facilitaron el cumplimiento de las restricciones del problema de optimización. También es de notar el hecho de que al no tener restricciones sobre el espacio de separación en frecuencia dúplex, fue posible tener muchos más casos exitosos de recanalización. Además para tener una mejor base de comparación y decisión sobre la configuración final de los enlaces hubiese sido de gran utilidad poseer la totalidad de información del throughput por estación, así como las proyecciones de crecimiento de capacidad de la red por nodo.

Para finalizar; el cruce de distintas áreas del conocimiento resulta ser una experiencia enriquecedora cuando es aplicado para la resolución de problemas desde distintos enfoques. La interdisciplinariedad es una característica cada vez más necesaria en el ámbito laboral ya que se entiende como una mayor flexibilidad en cuanto al tipo de tareas que el profesional está apto para realizar. Si bien es importante direccionar el desarrollo profesional en una línea específica, se debe procurar por la integridad en cuanto a los múltiples conocimientos y áreas de aplicación que la ingeniería tiene.

## 12. REFERENCIAS

- [1] A. Jagataia, R. Muralidharan y S. Pillai, «Trends and issues in data transport over optical networks,» Catálogo IEEE, 2001.
- [2] H. Lehpamer, Microwave transmission networks. Planning, design and deployment., New York: McGrawHill, 2010.
- [3] W. Tomasi, Sistemas de comunicaciones electrónicas, México: Pearson Educación, 2003.
- [4] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, Introducción a la investigación de operaciones, México: McGrawHill, 2010.
- [5] J. Brito, C. Campos, F. García, M. García, B. Melián, J. Moreno y M. Moreno, *Metaheurísticas: Una revisión actualizada*, San Cristobal de La Laguna, 2004.
- [6] D. W. Corne, M. J. Oates y G. D. Smith, Telecommunications Optimization: Heuristic and Adaptative Techniques, Jhon Wiley & Sons, 2000.
- [7] Y. Li, A. Cai, G. Quiao, L. Shi, S. Kumar y G. Shen, *Multi-Objective Topology Planning for Microwave-Based Wireless Backhaul Networks*, IEEE, 2016.
- [8] Y. Li, G. Quiao, A. Cai, L. Shi, H. Zhao y G. Shen, *Microwave Backhaul Topology Planning for Wireless Access Networks*, IEEE, 2014.
- [9] A. Lester, Project planning and control, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003.
- [10] Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones, *Resolución 2877 de 2011*, Bogotá, 2011.
- [11] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, *Resolución 290 de 2010*, Bogotá, 2010.
- [12] Congreso Nacional de Colombia, *Ley 1341 de 2009*, Bogotá, 2009.

- [13] Agencia Nacional del Espectro , *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias*, 2016.
- [14] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, *Decreto 4169 de 2011*, 2011.
- [15] Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones, *Resolución 2118 de 2011*, 2011.
- [16] Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones, *Decreto 4392 de 2010*, 2010.
- [17] International Telecommunications Union, *Reglamento de radiocomunicaciones Volúmen II: Apéndices*, 2012.
- [18] Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones, *Cuadro de características técnicas de la red*, Bogotá, 2016.
- [19] Ministerio de Tencologías de la información y las comunicaciones, *Resolución 1772 de 2016*, 2016.