APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE REDES DE FIBRA ÓPTICA PON, APLICADO A LA CIUDAD DE GUALACEO-PROVINCIA DEL AZUAY

APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE REDES DE FIBRA ÓPTICA PON, APLICADO A LA CIUDAD DE GUALACEO-PROVINCIA DEL AZUAY

ING. JUAN DIEGO JARA SALTOS

Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería

Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

ING. ARTURO G. PERALTA SEVILLA. MgT.
Ingeniero Eléctrico
Magister en Gestión de las Telecomunicaciones
Candidato a Doctor en Ingeniería
Docente Investigador de la Universidad Politécnica Salesiana
Facultad de Ingenierías
Carrera de Telecomunicaciones

Cuenca-Ecuador

Datos de catalogación

Juan Diego Jara Saltos

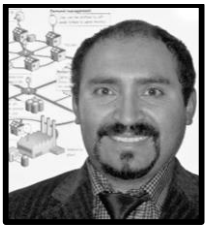
APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMATICO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE REDES DE FIBRA ÓPTICA PON, APLICADO A LA CIUDAD DE GUALACEO-PROVINCIA DEL AZUAY

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador, 2017
Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería
Formato 170 x 240 mm Páginas: _107_

Breve reseña de los autores e información de contacto:

Ing. Juan Diego Jara Saltos
Egresado de la Maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería
Universidad Politécnica Salesiana
jdjara1@hotmail.com

Dirigido por:



Ing. Arturo Peralta. MgT.
Graduado en la Universidad Politécnica Salesiana en 2002; Magister en Gestión de las Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana en 2011. Es Docente en la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
Miembro del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL). Actualmente es candidato a Doctor (Ph.D) en Ingeniería, especialidad en telecomunicaciones con la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

Todos los derechos reservados.
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.
DERECHOS RESERVADOS
©2017 Universidad Politécnica Salesiana.
CUENCA – ECUADOR – SUDAMERICA

JUAN DIEGO JARA SALTOS
Aplicación de un modelo matemático de optimización para la planeación de redes de fibra óptica PON, aplicado a la ciudad de Gualaceo-Provincia del Azuay.

Edición y Producción:
Ing. Juan Diego Jara Saltos
Diseño de la portada:
Ing. Arturo Peralta. MgT.
IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

ÍNDICE GENERAL

Contenido

1. REVISION DEL ESTADO DEL ARTE DE REDES PON 11

1.1 Funciones de los componentes de una red PON 11

1.1.1 Antecedentes Técnicos. 11

1.1.2 Terminal de Línea Óptica (OLT). 12

1.1.3 Terminal de Red Óptica (ONT) 13

1.1.4 Nodos remotos pasivos 14

1.1.4.1 Divisor Óptico 14

1.1.4.2 Arrayed Waveguide Gratings (AWG) 15

1.2 Tipos de Fibra Óptica. 16

1.3 Geometría básica de la transmisión en fibra óptica 17

2. DISEÑO DE RED PROYECTADA Y PLANTEAMIENTO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO 29

2.1 Ubicación de demanda proyectada existente en la localidad elegida 29

2.2 Ubicación de puntos geo-referenciados de clientes existentes en plano CAD. 31

2.3 Levantamiento de red PON existente según Método de Observación en sitio y entrevistas. ..32

2.4 Análisis de técnicas y métodos para proyección de clusters para el Modelo de Optimización. 34

2.4.1 Alternativas de Métodos de Agrupamiento para zonificación de usuarios. 34

2.4.1.1 Métodos de Agrupamiento. 34

2.4.2 Algoritmos de Agrupamiento y Optimización 35

2.4.2.1 Método Adaptativo 36

2.4.2.2 Algoritmo K-medias o K-means. 37

2.4.2.3 Algoritmo de set–cover. 38

2.4.2.4 Algoritmo de Dijkstra 41

2.4.2.5 Algoritmo de Cristalización Simulada (Simulated Annealing) 45

2.5 Determinación de la geometría y metodología para ubicación de equipos activos y pasivos. .45

2.6 Identificación del modelo de optimización, variables de entrada, variables de salida y restricciones. 48

2.6.1 Movimiento Browniano Geométrico (MBG) 48

2.6.2 Variables de entrada, variables de salida y restricciones. 50

2.6.2.1 Datos de Entrada. 51

2.6.2.2 Datos de Salida 53

2.6.2.3 Restricciones Generales 53

2.7 Obtención de la función objetivo que será optimizada (máx) 53

2.7.1 Función Objetivo. 55
2.7.2 Restricciones en la Función Objetivo 56
3. APLICACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN EL DESPLIEGUE DE LA RED PARA LA REGIÓN DE PLANEACIÓN 59
3.1 Aplicación del modelo de optimización MILP (Programación Lineal Entera Mixta). 59
3.2 Algoritmos a ser utilizados en la solución del problema de optimización 60
3.3 Generación de escenarios y análisis de resultados. 64
3.4 Comparación de la red planeada de forma determinista vs. Resultados obtenidos con el modelado matemático MILP. 67
3.4.1 Ubicación de OLT y Splitters con modelo Determinista. 67
3.4.2 Gráfica y Cuadro Comparativo 68
4. CONCLUSIONES 73
4.1 Aportes de la tesis 73
4.2 Futuras Líneas de Investigación. 75
BIBLIOGRAFÍA 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. OLT. Modelo MA5603T HUAWEI 13
Figura 2. Operación de TDM en GPON 14
Figura 3. Operación genérica de un divisor óptico. 15
Figura 4. Grafico esquemático de un sistema AWG convencional. Fuente [5]**.** 16
Figura 5. Refracción y Reflexión de luz en la frontera de un material. 18
Figura 6. GPON. Dos niveles de divisores ópticos 21
Figura 7. GPON. Un nivel de divisores ópticos 22
Figura 8. Topología de Red Multiservicios soportada en Red GPON. Fuente. Autor. 26
Figura 9. Ubicación de clientes potenciales de Fibra Óptica - Gualaceo. Puntos de color verde. 31
Figura 10. Segmentación de posibles distritos de la zona de análisis. 32
Figura 11. Topología de Red de acceso-fibra óptica punto a punto y conversores eléctrico-ópticos. 33
Figura 12. Distribución de Divisores ópticos en una zona de muestra. Cantón Gualaceo 34
Figura 13. Representación del problema set–cover dividido en 5 regiones. 39
Figura 14. Ejemplo gráfico para la aplicación del Algoritmo de Dijkstra 43
Figura 15. Primera Iteración del Algoritmo de Dijkstra para determinar distancias mínimas**.** 44
Figura 16. Representación gráfica de la n-esima iteración de Dijkstra para determinar distancias mínimas. 44
Figura 17. Ubicación de pares (x,y) de clientes y Centroides en Matlab. 46
Figura 18. Ubicación de pares (x,y) de clientes y cambio de centroides. 47
Figura 19. Ejemplo de representación luego de análisis mediante Movimiento Browniano alrededor de 300 iteraciones de una partícula que genera múltiples rutas. Fuente. [34] 49
Figura 20. Potenciales Usuarios a ser colocados una ONT 51
Figura 21. Proceso del Modelo de Optimización**.** 60
Figura 22. Proceso del Modelo de Optimización. 61
Figura 23. Proceso-Conjunto de soluciones dentro de una región de planeación. 62
Figura 24. Grilla-Malla geo-referenciada y levantada en MATLAB de la región de Aplicación - Gualaceo 64
Figura 25. Árbol de Proyección. ONT –UDAPs Proyectados vs Probabilidad 65
Figura 26. Beneficio Esperado vs políticas generadas 66
Figura 27. Ubicación de equipos pasivos – Modelo Determinista 67
Figura 28. Ubicación de potenciales clientes con su Nodo Splitter de servicio más cercano. Modelo Determinista. 68
Figura 29. ONT cubiertas por año de planeación. Índice de escalabilidad Horizontal. 69
Figura 30. Graficas generadas luego del Modelo de Optimización por periodo de crecimiento de Demanda y Total. 71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variantes WDM-PON, parámetros de WDM-PONs y WDM/TDMA-PONs híbridas. Fuente [12]. 22
Tabla 2. Estándares PON 24
Tabla 3. Listado de clientes actuales ADSL - potenciales a migrar a FTTH**.** 30
Tabla 4. Ejemplo de Matriz Dispersa en set–cover**.** 40
Tabla 5. Valores de matriz inicial. Algoritmo de Dijkstra**.** 43
Tabla 6. Datos de Ingresos y Costos referenciales para Cálculos en el modelo de Optimización. 52
Tabla 7. Comparativa conceptual del algoritmo Simulated Annealing. Termodinámica-Problema de Optimización. 62
Tabla 8. Datos del modelo determinista y el modelo Estocástico de Optimización**.** 69

DEDICATORIA

"Todo propósito representa tener fe y optimismo en las convicciones de nuestros ideales".

Juan Diego Jara Saltos.

A mis hijos Victoria y Juan Josué.

PREFACIO

El desarrollo de la presente tesis nació por un interés personal de poder profundizar en el Desarrollo e Implementación de Redes de acceso de Fibra Óptica, que están aún en etapa de desarrollo en Ecuador, tanto en Ciudades Capitales de Provincia como en cantones pertenecientes a zonas donde la inversión por el despliegue de las TICs o Tecnologías de Información y Comunicación se encuentran en progreso e impulsadas por entes Gubernamentales.

En el transcurso de mi vida profesional he despertado un interés por las tecnologías de Telecomunicaciones, y en investigaciones que permitan profundizar sobre temas que en hoy en día son realizados de forma empírica o mediante esquemas determinísticos. Con este antecedente, el reto en esta investigación se fundamentó en poder evidenciar la complejidad de los problemas reales en telecomunicaciones y poder explicar ciertos fenómenos que llevan al despliegue exitoso de una red de telecomunicaciones de acceso en Fibra Óptica basada en tecnología GPON mediante un modelo matemático de Optimización.

Precisar sobre alguna empresa dedicada a la venta de servicios de Telecomunicaciones, es una idea que surgió por las múltiples observaciones de campo realizadas en ciudades pequeñas de nuestro país, con especial énfasis en la área urbana de la Ciudad de Gualaceo – Provincia del Azuay. De igual manera me permito aclarar la delimitación de esta tesis, gracias a la oportunidad brindada por la Empresa CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones) de laborar en la misma hace algunos años. Me permito señalar que este proyecto de Tesis ha sido desarrollado bajo la dirección del Magister Arturo Peralta, candidato a Doctor en Ingeniería, especialidad Telecomunicaciones con la Universidad Pontificia Bolivariana.

Al realizar este proyecto de Tesis, me ha parecido un aporte de investigación interesante sobre como tener una visión realista de la implementación de un proyecto que lleve a la puesta a producción de equipamiento pasivo que conforman una red GPON, así como se necesita de un relativo esfuerzo computacional para poder determinar ciertos parámetros de decisión en un ambiente de Incertidumbre, el proyecto de tesis puede enfocarse también con fines de beneficio social y comunitario, según se planifique implantar redes de Fibra Óptica con un claro panorama en cuanto se refiera a parámetros que permitan invertir en un proyecto de redes de acceso.

PRÓLOGO

En la presente tesis titulada *"Aplicación de un modelo matemático de optimización para la planeación de redes de fibra óptica PON aplicado a la ciudad de Gualaceo-Provincia del Azuay"*, se estudia, investiga, analiza y compara el despliegue de redes PON en ambientes reales de nuestro medio con un posible despliegue basado en un modelo matemático de Optimización.

Esta Tesis está divida en cuatro capítulos: el primero es una revisión del estado del Arte en lo referente a redes de Fibra Óptica mediante tecnología PON, dónde se describe los dispositivos ineludibles que constituyen una red de acceso y su funcionamiento a nivel de capa física. En el segundo capítulo se analizan algunos algoritmos que pueden ser necesarios de aplicación para el cumplimiento del objeto de esta tesis y se describe la función objetivo de nuestro planteamiento que dará una posible solución al problema que se pretende resolver. El tercer capítulo, brinda un esquema de los efectos que se obtienen de las simulaciones realizadas con los esquemas de algoritmos aplicados y el modelamiento mediante una muestra gráfica de lo planteado, esto permitirá tomar las mejores decisiones para el despliegue de una Red de acceso de Fibra Óptica.

El cuarto capítulo corresponde a las conclusiones, luego de la implantación del modelo realizado en la zona de muestra del Cantón de aplicación. Los cuatro capítulos, se han ordenado de manera lógica, todos atienden a un esquema básico y necesario para el desarrollo e implantación del modelo matemático de Optimización.

En la parte final de esta Tesis se muestra una lista bibliográfica de los artículos, libros y páginas web en línea utilizados, para dar soporte investigativo al documento realizado, que pretende dar una visión General del despliegue de redes PON en el cantón Gualaceo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar le agradezco a Dios y la Virgen María Auxiliadora, por darme la salud física y mental para poder terminar con cada objetivo que se ha presentado en mi vida.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, por haberme ofrecido la oportunidad, de cursar esta maestría que me ha permitido desarrollar nuevos conocimientos profesionales.

De manera especial un Agradecimiento al Ing. Arturo Peralta, compañero y amigo, quien me ha guiado durante el desarrollo de la Tesis como Tutor y Director.

Gracias al amor de mis hijos, que me han dado el apoyo necesario con su cariño, afecto y amor para poder culminar una etapa más de mi vida.

A todos los que me supieron apoyar, muchas gracias.

CAPÍTULO 1

1. REVISION DEL ESTADO DEL ARTE DE REDES PON

1.1 Funciones de los componentes de una red PON

1.1.1 Antecedentes Técnicos.

El estándar GPON (Gigabit Passive Optical Network) es el resultado de la mejora en algunas de las características de las recomendaciones basadas en la tecnología PON. Una red PON (Passive Optical Network) es una tecnología de acceso para servicios de telecomunicaciones mediante la implementación de cables de fibra óptica, con elementos que no requieren de energía para funcionar, es decir elementos pasivos. El beneficio de la implementación de tales componentes, es la reducción del coste de equipos que tienen que ser instalados hasta el usuario final de un servicio. Se supone que la implementación de este tipo de redes en transmisión de señales ópticas, considerando ciertos ingresos, compensará la inversión (CAPEX) y los gastos de Operación (OPEX). Se debe considerar el elevado gasto debido al tendido de fibra óptica entre la central o nodo y los clientes o usuarios finales de un servicio.

Cabe recordar que el desarrollo de conocimiento en fibra, inicia durante los últimos años antes de 1990. Durante estos años se genera una disminución del valor monetario de los cables ópticos y de la mano se genera la incertidumbre de facilitar grandes velocidades simétricas y mejores servicios a usuarios corporativos y residenciales. Basado en este antecedente se despierta un interés técnico y económico por el despliegue de redes de transmisión en fibra óptica, sustituyendo en gran medida los enlaces de radio basados en tecnología de jerarquía digital SDH/PDH e instalándose enlaces por medio de fibra óptica. Entonces con este antecedente empieza en muchos operadores a despertar el empeño por las redes de acceso ópticas. Se inicia con dos tipologías de recursos técnicos: las denominadas PON y AON. PON que brindaban bajo consumo de potencia y AON cuyo funcionamiento que requería de equipos activos para la distribución de la señal, lo que implicaba que esta red sea más costosa.

En el año 1995 se inaugura FSAN como el primer ente cuyas directrices fueron dictar una reglamentación para interoperabilidad entre los suministradores y operadores que pretendían trabajar con accesos PON. FSAN administra un foro para los más importantes facilitadores de servicios de telecomunicaciones y suministradores de dispositivos con el único fin de trabajar hacia un objetivo común encaminado a redes de acceso de gran capacidad. Este organismo cuenta con más de 70 organizaciones miembros, entre ellas más de 20 Operadores de Red, que representan a los principales expertos en tecnologías BPON, GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2. [1]

En las distintas topologías, que conforman las redes PON, se hallan algunos dispositivos, los mismos que serán mencionados y detallados en este capítulo y que forman la columna vertebral de la red, es decir elementos estrictamente necesarios para el despliegue de redes PON.

1.1.2 Terminal de Línea Óptica (OLT).

La OLT es un dispositivo de hardware que va instalado en la central o nodo del proveedor o empresa que brinda el servicio de Telecomunicaciones.

El equipo dispone de tarjetas de control, administración y gestión de tráfico de datos (Uplink/Downlink) así como diferente tarjetería perteneciente a los puertos PON cuya función es la distribución de servicio hacia los clientes como se muestra en la Figura 1.

Este equipo denominado "terminal de línea óptica" es el responsable del control de flujo en dos direcciones de la información que fluye, haciendo uso de una Red de Distribución Óptica. Este dispositivo puede estar habilitado para soportar comunicaciones a distancias considerables, alrededor de en un rango de 20 kilómetros dónde se encontraría el dispositivo de usuario.

El dispositivo OLT en su proceso general de funcionamiento, es administrar el tráfico de voz, datos y video proveniente del núcleo de la red (Core Network), cuya tecnología comúnmente en la actualidad es el uso de conmutación de etiquetas multiprotocolo (MPLS). También se encargará de reenviar los datos que son administrados por el equipo, a todos los módulos de los equipos terminales de usuario que se localizan en alguna ubicación dentro de la cobertura de red. Ahora, los datos que forman parte del envío de información hacia la red o tráfico de subida (upstream), la terminal de línea óptica aceptarán e intercambiarán todo el tráfico hacia la red de clientes. [2].

Una de las principales características de un dispositivo de terminal óptico de línea es la transmisión paralela de algunas clases de servicio que pueden ser trasladados en la misma fibra óptica dentro de la red ODN, haciendo uso de diferentes longitudes de onda para cada trayectoria. Para descargar información, un puerto PON utiliza una longitud de onda o lambda de 1490 nanometros para tráfico de voz y datos, y una longitud de onda de 1550 nanometros para la distribución de tráfico de vídeo. El tráfico de voz y datos en sentido inverso a la descarga, utiliza una longitud de onda de 1310 nanometros. [1]

Cada equipo como se menciona en el párrafo anterior, entonces tiene la responsabilidad de impedir la interferencia entre el contenido del enlace descendente del anal ascendente, es por esta razón que hace uso de dos longitudes de onda de superposición distintas (1550nm/1310nm), que están soportadas en multiplexación por división de longitud de onda (WDM).

Cuando la OLT ha pasado un proceso de "checklist" y está comisionada para producción, antes de la activación de clientes, es necesaria una medición de potencia óptica en el dispositivo, con el único interés de asegurar que se suministra suficiente potencia a los dispositivos de usuario una vez que la red ha sido puesta a producción.

Hay que considerar que la OLT no emite la misma salida de luz en todos las ONTs, pues estos dependen de la distancia de enlace local. Por lo tanto, un usuario cercano a la central necesita menos energía, mientras que un usuario remoto necesitará mayor potencia para alinearse con la OLT.

Figura 1. *OLT. Modelo MA5603T HUAWEI*

1.1.3 Terminal de Red Óptica (ONT)

Este dispositivo se encuentra directamente en las instalaciones del cliente y tiene la responsabilidad de brindar la conectividad óptica hacia puerto PON y la conexión eléctrica hacia la red de área local del cliente. Dependiendo las necesidades de comunicación del cliente, la ONT soporta una mezcla de servicios que se pueden ofrecer, incluyendo varios estándares tales como: Ethernet, T1 o E1 (1.544 o 2.048 Mbps) y DS3 o E3 (44.736 o 34.368 Mbps), interfaces ATM (155 Mbps), y formatos de vídeo digital y analógico [1]. El tamaño de un equipo terminal ONT puede ir desde una simple caja que puede estar unida al exterior de una casa a una sofisticada unidad montada en un rack.

Un dispositivo ONT, puede transportar algunos tipos de tráfico de información que provienen del cliente o usuario final y enviarlo en sentido hacia la red o llamado "upstream" haciendo uso de un solo hilo óptico en una red pasiva. El equipo terminal de red óptico realiza una función de filtrado de un flujo de datos multiplexado por división de tiempo, luego identifica los destinos de los canales multiplexados

individuales y finalmente reorganiza los canales para que ellos puedan ser entregados eficientemente a sus destinos es decir se queda solo con los que van dirigidos a su red local o usuario final [1].

Entonces se puede afirmar que las ONT son elementos capaces de filtrar la información asociada con un usuario particular de la OLT. También tienen la función de encapsular la información de un usuario y enviarla hacia la OLT. La información de la OLT se transmite por TDM, y llega a todos los ONT por igual. Sin embargo, la ONT tiene la obligación de filtrar la información que va dirigida a sí misma (en un periodo dado). En la Figura 2 se muestra de forma gráfica la operación de un proceso TDM.

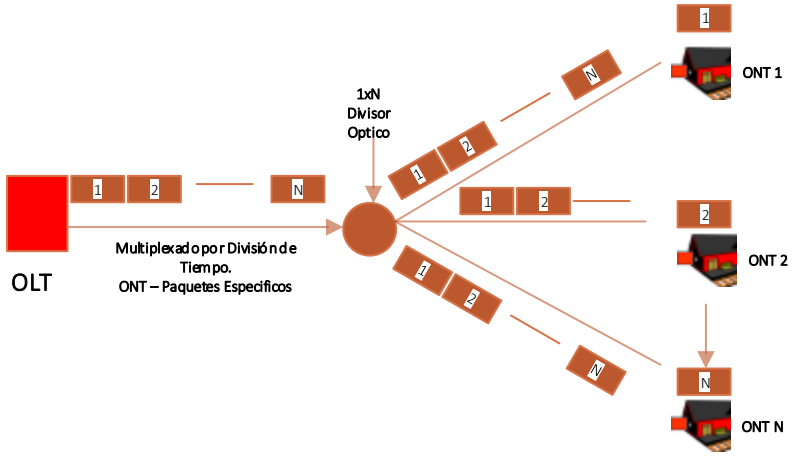


Figura 2. *Operación de TDM en GPON*

1.1.4 Nodos remotos pasivos

1.1.4.1 Divisor Óptico

Los divisores ópticos o Splitters son dispositivos de tipo pasivo cuya funcionalidad es poder comunicar la OLT con la ONT. Básicamente son distribuidores ópticos bidireccionales que tienen una entrada y varias salidas. Toda señal que ingresa desde un puerto con tráfico descendente cuya fuente es la OLT, es segmentada a través de varios puertos de salida. Las señales que salen en sentido ascendente es decir cuya fuente es el equipo terminal de un usuario son combinadas en una sola entrada. Los divisores ópticos pasivos son elementos que no requieren alimentación de energía por lo que implica su bajo costo de instalación y operación.

Sin embargo considerando la implementación masiva de estos dispositivos en una red nueva, muestran una desventaja en lo referente a potencia óptica, pues por cada equipo se tendría una ligera atenuación en el trayecto de red [3]. Se deriva una relación matemática inversa entre las pérdidas por atenuación generadas por el divisor óptico y el número de salidas de este dispositivo, esta relación se muestra en la ecuación (1).

$$Atenuación_{SPLITTER} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{n}\right) \quad (1)$$

En esta ecuación las pérdidas generadas son expresadas en decibelios y un valor de *n* cuyo significado en la fórmula representa el número de salidas que tendría cierto divisor, por ejemplo un divisor con dos salidas, en el peor de los casos, pierde 3 decibelios (dbs) (la mitad de la potencia) en cada salida. Este fenómeno puede ser representado como muestra la Figura 3.

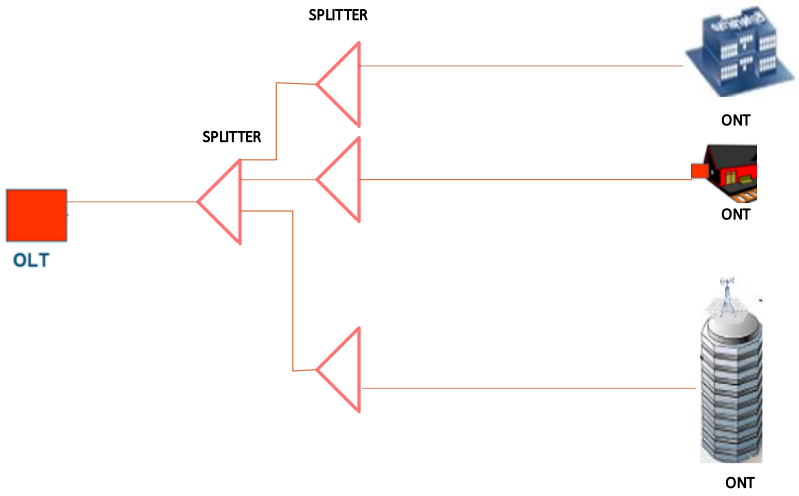


Figura 3. *Operación genérica de un divisor óptico*.

1.1.4.2 Arrayed Waveguide Gratings (AWG)

Los dispositivos AWG son utilizados en una red como multiplexores/demultiplexores ópticos en sistemas por división de longitud de onda (WDM). Estos dispositivos son capaces de multiplexar un gran número de longitudes de onda en una única fibra óptica, aumentando así considerablemente la capacidad de transmisión de las redes ópticas. Su funcionamiento se basa en el principio fundamental de la óptica donde *"las ondas de luz que tienen diferentes longitudes de onda interfieren linealmente entre sí"*. Esto significa que, si cada canal de una red de comunicación óptica hace uso de la luz de una longitud de onda ligeramente diferente, entonces la luz de un gran número de estos canales puede ser transportada por una única fibra óptica con una diafonía despreciable entre los canales. Los AWG se utilizan para multiplexar canales de varias longitudes de onda sobre una única fibra óptica en el extremo de transmisión y también se utilizan como demultiplexores para recuperar canales individuales de diferentes longitudes de onda en el extremo receptor de una red de comunicación óptica [4].

Un AWG estándar maneja una longitud de onda que se propaga dentro de un acoplador de longitudes de onda (Figura 4) y luego la propaga en diferentes direcciones. Cada guía de ondas cuya agrupación es sucesiva, dispone de una longitud de recorrido mayor que su guía de onda vecina, y que corresponde a un valor de *m* veces un entero de la longitud de onda central de funcionamiento, tomando en cuenta un medio ideal. La matriz tiene entonces una diferencia de longitud de recorrido entre cada guía de onda vecina (ΔL) y está expresada mediante la Ecuación 2.

$$\Delta L = \frac{m \cdot \lambda_0}{n_a} \tag{2}$$

Entonces el valor de *m* corresponde a él orden de la matriz, y el valor denominado λ_0 corresponde a la longitud de onda central de funcionamiento, y el valor de n_a es un valor correspondiente a él índice efectivo del arreglo de guía de ondas [5].

Figura 4. *Grafico esquemático de un sistema AWG convencional. Fuente [5]*.

1.2 Tipos de Fibra Óptica.

En la actualidad, debido al despliegue de redes de transmisión DWDM y MPLS, así como las actuales redes de acceso PON, se han desarrollado algunas clasificaciones y con documentos estándares de parámetros correspondientes a fibras ópticas, por ejemplo: modo de propagación, índice de refracción, así como también de acuerdo a los materiales con los que se fabrica una fibra óptica, parámetros de tensión, etc, correspondientes a manuales de uso de la fibra.

1.2.1 Clasificación en base al modo de propagación

1.2.1.1 Fibras Monomodo

Es uno de los tipos de fibra óptica, que nos ofrece uno de los mayores beneficios requeridos que es la capacidad de transportar datos entre puntos que están relativamente distanciados, considerando que una de sus ventajas es disponer de una banda de paso

que supera los 100GHz por kilómetro. Según los constructores de este tipo de elemento, se logra los más altos flujos de datos por medio de este tipo de fibra, sin embargo presenta un alto grado de complejidad al momento de fabricarla. Una consideración importante es que solo pueden transmitirse los rayos que presentan un recorrido cuya ruta es el eje de la fibra, es por esta razón la denominación de fibra monomodo cuyo modo de propagación del haz de luz es único [6].

1.2.1.2 Fibra Multimodo

En las fibras Multimodo pueden ser conducidos varios haces de energía lumínica al mismo tiempo, el radio del núcleo de este tipo de fibras típicamente suele ser 25 micro metros, en consecuencia el acoplamiento de la luz resulta más simple en comparación con otra.

1.2.2 Por su composición

En el mercado actual, y según entrevistas a personal técnico encargado de procesos de adquisición de cables en Empresas establecidas en el mercado ecuatoriano, se ha evidenciado que se pueden encontrar los siguientes modelos o tipos de fibras ópticas:

- Núcleo de plástico/Manto plástico
- Núcleo de vidrio/Manto plástico
- Núcleo de vidrio/Manto de vidrio

Los cables fabricados de plástico tienen ciertas ventajas en comparación con las que son fabricadas con material de vidrio, esto se debe a su característica en cuanto a flexibilidad, fácil instalación por su maniobrabilidad, resistentes a mayor presión y na caracteística importante que es su costo, mismo que es menor. Sin embargo mantiene una desventaja relacionada con el nivel de atenuación cuyo valor es más alto por lo que no propagan la energía de forma eficiente en comparación con una de vidrio, razón importante por lo que a distancias cortas tiene su aplicabilidad [6].

1.3 Geometría básica de la transmisión en fibra óptica

Respecto a la geometría de la fibra óptica, uno de los parámetros importantes en cuanto al material es el índice de refracción. En el espacio libre una onda de luz tiene una velocidad cuyo valor se aproxima a $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s], la velocidad de propagación (v) está relacionada con la frecuencia y la longitud de onda λ como se muestra en la Ecuación 3.

$$c = v \cdot \lambda \tag{3}$$

La onda de luz, cuando logra ingresar a un medio no conductivo, su velocidad se corresponde en ese nuevo instante a v, la misma que forma parte de una de las

características del material y en valor menor que la velocidad de la luz *c*. La proporción de la velocidad de la luz en el vacío viene dada por el índice de refracción *n* del material [7], y está dado por la Ecuación 4.

$$n = \frac{c}{v} \tag{4}$$

Los valores típicos de *n* son 1 para el aire; 1,33 para agua y 1,5 para material de vidrio.

Términos como reflexión y refracción, pueden ser comentados de una forma más sencilla en base a la consideración del comportamiento de los distintos haces de energía óptica agrupados con ondas planas que se mueven por un material dieléctrico. Cuando el haz de luz logra encontrar un margen que separa medios distintos, una porción de este es reflejado hacia el primer medio siendo refractada la sobrante que entra en el segundo material. Lo analizado se procede a indicar de forma gráfica en la Figura 5.

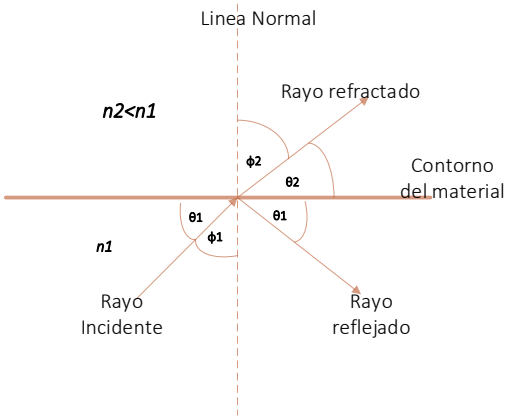


Figura 5. *Refracción y Reflexión de luz en la frontera de un material.*

La refracción de rayos de energía óptica, es la derivación de la diferencia de la velocidad de luz en dos distintos materiales, por ende diferentes índices de refractividad. La relación en la interfaz, matemáticamente es conocida como la ley de Snell y se expresa como se indica en Ecuación 5.

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \sin(\varphi_1) &= n_2 \cdot \sin(\varphi_2) \\ n_1 \cdot \cos(\theta_1) &= n_2 \cdot \cos(\theta_2) \end{aligned} \tag{5}$$

Con referencia a la ley de reflexión el ángulo θ_1, mediante el cual el haz de energía de luz incidente cae en la interfaz, es igual al ángulo del rayo reflejado en la misma interfaz.

Adicionalmente al haz que incide, el vector normal a la interfaz y el rayo reflejado se suprimen en el mismo plano, que es ortogonal al mismo plano de la interfaz, entre los materiales [8].

Es importante considerar una de las leyes más importantes de la óptica es la ley de Schrödinger sobre los efectos de propagación de la luz en la fibra óptica. En [9] los autores analizan los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos y una solución analítica, el caso de estudio es una fibra de red de acceso. La ecuación considerada efecto no lineal de Schrödinger (NLSE) presentado en la Ecuación 6:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^2} \tag{6}$$

Dónde, tomando la transformada de Fourier a la Ecuación 6, con el objetivo de resolverla en el dominio de la frecuencia, se obtiene la Ecuación 7 que es la solución de la envolvente del campo en el dominio de la frecuencia.

$$\hat{A}(z,\omega) = \hat{A}(0,\omega)\cdot e^{j\left(\frac{\beta_2}{2}\omega^2 - \frac{\beta_3}{6}\right)z} \tag{7}$$

1.4 Topologías típicas para el despliegue de redes PON.

En redes ópticas pasivas existen algunas topologías de red las cuales dependen de la demanda a ser servida y los estándares PON, mismos que especifican distancias máximas alcanzables de hasta 20 km entre OLT y ONT.

Para realizar la planeación de una topología de red PON se consideran las siguientes recomendaciones para la distancia máxima alcanzable:

- La potencia a ser emitida se clasifican según el tipo de clase de los equipos que pueden ser del tipo A, B, C, o D. Como ejemplo para un B, un valor típico de oscila entre 3 hasta 7 dBm.
- La mínima potencia de señal que es capaz de reconocer correctamente o llamada sensibilidad, se corresponde comúnmente con un valor de -26 dBm.
- Por inserción de pérdidas que se introducen en un cable de fibra óptica, cuyo valor depende de la longitud de onda que se genere, que para el caso de aplicación de tecnología PON se corresponde con valores según su valor de longitud de onda. (0.40 dB/km para 1310 nanometros y 0.35 dB/km para 1490 nanometros.)

- Atenuaciones generadas por la inserción de equipos pasivos en la red, parámetros que dependen específicamente de las relaciones de división pasiva que se realice.
- Pérdidas introducida por los conectores, típicamente esta es de 0.5 dB aproximadamente [10].
- Atenuaciones generadas por empalmes, para el caso por ejemplo de empalmes mecánicos, se introduce típicamente una pérdida de 0.5 dB, mientras que para casos más comunes por ejemplo de un empalme por fusión, será de 0.1 dB.

Una consideración importante en el diseño de una red típica PON para ciudades relativamente pequeñas (p.ej. Cuenca y Gualaceo), es que los divisores ópticos o Splitters, involucran una pérdida considerable de potencia en relación con el resto de componentes de la red, por lo tanto, el diseño debe equilibrar la ramificación de fibras o conexiones mediante mufas, distancias a los clientes, y las potencias de los equipos. Por otra parte, desde el punto de vista económico, debe analizarse cuidadosamente las configuraciones posibles de topologías de red, con un compromiso entre la cantidad de divisores a utilizar, la cantidad de hilos de fibra y el número de puertos necesarios en el equipo PON en la central.

1.4.1 Topología Típica 1, dos niveles de Splitters

Esta topología comprende algunos segmentos de red óptica, cuyo nombre se denomina red de alimentación o comúnmente "feeder" se compone de un tramo inicial de fibra óptica denominado "feeder'' (equivalente al cable primario de red de planta externa en redes de última milla telefónicas). Después de esta red se conforma los segmentos pasivos cuya segmentación es 1 entrada a 4 salidas. Posteriormente se considera un enlace de red de fibra que equivaldría al cable secundario en redes de plana externa en cobre, donde su punto de terminación corresponde a una siguiente etapa de división óptica en la zona donde se encuentran los potenciales usuarios de un servicio, este divisor de relación 1:8 se puede interpretar como una caja de dispersión o distribución en cobre. Desde éste último divisor se procede a instalar el cable de acometida o dispersión de fibra óptica (Llamado cable drop) hasta un terminal de usuario. La Figura 6 muestra una topología esquemática de un posible diseño que podría ser implementado partiendo de esta sugerencia, es decir por ejemplo 32 potenciales clientes que serán atendidos desde un puerto PON mediante dos fases de división de señales.

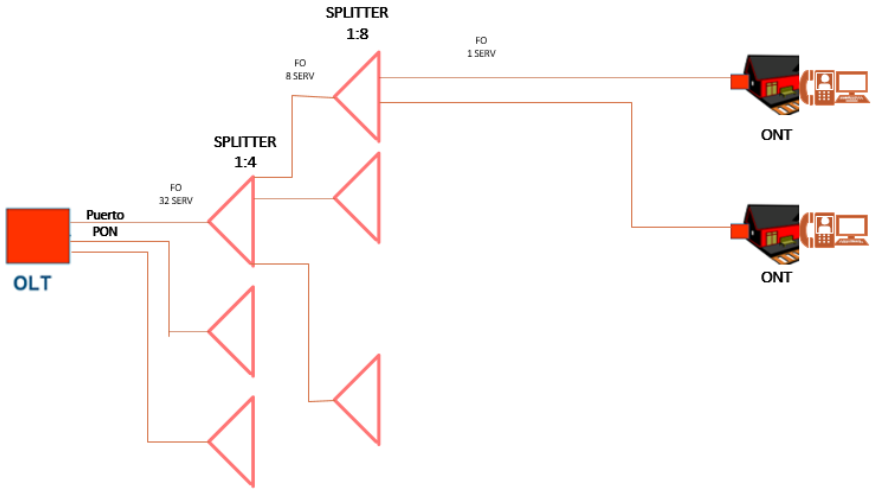


Figura 6. *GPON. Dos niveles de divisores ópticos*

1.4.2 Topología Típica 2, un nivel de Splitters

Esta manera de planificación de red está conformada por segmentos de red, donde en una primera instancia está compuesta por un primer segmento de cable óptico que inicia en la central de un proveedor de servicio y se extiende hacia las ubicaciones geográficas que pertenecen a los potenciales usuarios del servicia a brindarse. Después durante el despliegue de red se continúa con la fase correspondiente a la habilitación de divisores, cuya relación de división es de 1 entrada a 8 salidas, hay que considerar que este divisor puede interpretarse equivalente a una caja de dispersión de la red de planta externa telefónica, cuyo cable de igual manera que la anterior descripción topológica dispone de un cable (drop) de acometida de fibra hasta alcanzar los potenciales usuarios del servicio. Para este planteamiento de red, se dispondrían de ocho 8 potenciales usuarios que solicitarían servicio a un único puerto PON, tomando en cuenta que cada nodo podría disponer de una bahía de ocho puertos PON, es decir obtendríamos 64 usuarios de servicio por cada central. Adicionalmente cada equipo en central dispone en la mayoría de casos de al menos 4 interfaces de 1 Gbps para enlace ascendente hacia el backbone de red, en consecuencia se puede considerar un tráfico promedio por potencial usuario de servicio de 63 Mbps como máximo [11].

En la Figura 7 se esquematiza un segmento de red PON, con posibles usuarios por puerto en central, implementado con al menos dos fases de división óptica pasiva.

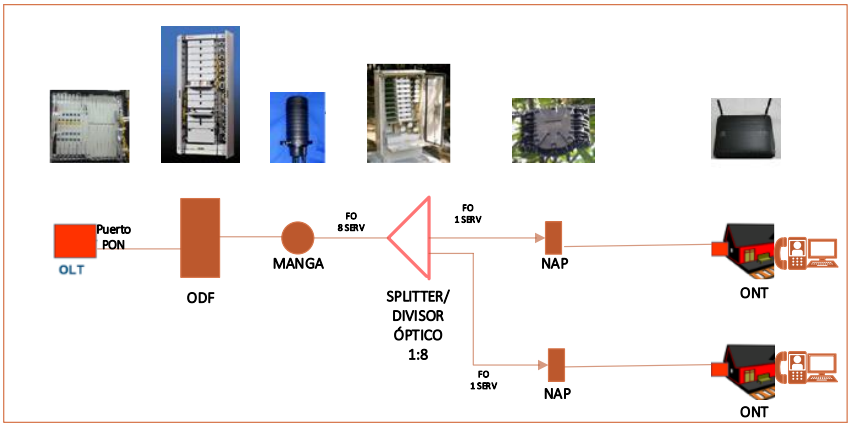


Figura 7. *GPON. Un nivel de divisores ópticos*

1.5 Variantes PON con TDM

Para el caso de estudio de este trabajo se tomará en cuenta en capítulos posteriores, interfaces GPON y EPON, las mismas que tienen distintas características con referencia a la velocidad. Considerando adicionalmente que en GPON se utiliza acceso por división de tiempo (TDMA), es decir intervalos de tiempo para lograr una transmisión la cual se relaciona con el ancho de banda que puede usarse para dar servicio a clientes. Bajo esta consideración existe la relación de la tecnología de acceso PON con la tecnología de multiplicación TDM. Históricamente para el transporte de datos de capa 3 sobre ATM y TDM, las nativas PON soportan la actualización de red física para servicios iniciales que funcionan en algunos casos aún con tecnologías de Canal Puro sobre TDM o Frame Relay (servicios conocidos como legacy). Entonces los nuevos requerimientos como Triple Play requieren de la adaptación de esta tecnología pasiva.

Con el avance de las tecnologías de fibra óptica, se han estudiado entonces nuevas tecnologías como por ejemplo WDM que trabaja con redes PON, y existen algunas variaciones de las mismas en la actualidad por mencionar algunas como ejemplo se tiene ultra WDM-PONs, DWDM y otras que se dan a conocer en la Tabla 1.

Tabla 1. *Variantes WDM-PON, parámetros de WDM-PONs y WDM/TDMA-PONs híbridas. Fuente [12].*

	Divisor WDM-PON	**AWG-basado en PON**	**CWDM-PON**	**AWGs en cascada**
Velocidad de Subida y Bajada dedicado en Gbps	1, 2.5, 4, 10	1, 2.5, 4, 10	1, 2.5, 4, 10	1, 2.5, 4, 10
Longitudes de onda (Grid)	100 (50) GHz	100 GHz. 50 GHz	20 nm (bandas L, C, S y O)	100 GHz. 50 GHz

División/Relación	1:32	1:40	1:8	1:40
Presupuesto Máximo [dB]	8(1G APD)	10 (1G PIN)	13 (1G PIN)	12 (1G APD)
Costo de enlace (ONU)	242 (1G por λ)	256 (1G por λ)	122 (1G por λ)	300 (1G por λ)
	DWDM Amplificado	**CWDM+TDMA**	**DWDM+TDMA**	**TDMA**
Velocidad de Subida y Bajada Gbps	1, 2.5, 4, 10 dedicado	Hasta 1Gbps para relaciones 1a8 y 2.5Gbps	Hasta 1Gbps (500 Mbps para un divisor 1:4 and 2.5Gbps de velocidad , 90% de eficiencia)	Hasta 1Gbps (250 Mbps para un divisor 1:8 and 2.5Gbps de velocidad , 90% de eficiencia)

1.6 Estándares de las redes PON.

Existen actualmente los siguientes estándares para redes XPON basados en las diferentes recomendaciones de la ITU-T G.983, ITU-T G.984 e IEEE 802.3ah.

1.6.1 ITU-T G.983.

Denominada APON (ATM Passive Optical Network), fue el primer estándar de red pasiva, usado principalmente para aplicaciones de negocios y se basaba en transmisión de tráfico ATM (Modo de Transferencia Asíncrona). Por ejemplo BPON (Broadband PON), es un estándar basado en APON el cual aportó nuevas mejoras como la multiplexación por longitud de onda o WDM, incrementando mediante este método de multiplexado el ancho de banda.

1.6.2 Recomendación ITU-T G.984.

Denominada GPON (Gigabit PON), la cual es una evolución de BPON, permitiendo una optimización de la transmisión del tráfico IP y ATM mediante el uso de celdas de tamaño variable [13]. Esta recomendación describe una red de acceso flexible que soporta anchos de banda requeridos por usuarios corporativos y residenciales, con una velocidad de línea de 2,4 Gbps de descarga de información y 1,2 Gbps en dirección de subida de información hacia la red.

Esta recomendación también describe las características generales de una GPON basada en requerimientos de los operadores de servicio de datos e internet.

1.6.3 Recomendación IEEE 802.3ah.

Las redes ópticas pasivas Ethernet, tienen importancia por su valioso aporte, al permiti llevar trafico tráfico proveniente de redes con Estándar Ethernet en ves del típico clásico flujo de datos por medios de tecnología ATM y considerando la optimización del flujo de datos proveniente de protocolo IP, logra implementar un nivel de seguridad y velocidades considerables en recepción y transmisión de flujos. Para redes Ethernet PON son usadas las arquitecturas de despliegue desde un punto hacia varios destinos haciendo uso de dispositivos pasivos, que en nuestro estudio son los divisores ópticos. Como todo ISP debe disponer de un sistema de gestión de red, que podría ser mediante protocolo simple de gestión de red, que permitirá mantener en marcha la red y poder brindar solución a posibles inconvenientes que se puedan generar. Como ejemplo, en un estándar 100BASE-LX10 puede llegar alcanzar 10 km teóricos a través de cables típicos de dos hilos ópticos [14]. La Tabla 2 presenta las características principales de los estándares antes mencionados.

Tabla 2. *Estándares PON*

	IEEE EPON	**ITU-T GPON**	**ITU-T BPON**
Velocidad de línea descendente (Mbps)	1 250	1244.16 o 2488.16	155.52 or 622.08 or 1244.16
Velocidad de línea canal ascendente (Mbps)	1250	155.52 0 622.08 o 1244.16o 2488.32	155.52 0 622.08
Codificación de línea	8b/10b	NRZ (+ aleatorización)	NRZ (+ aleatorización)
Direccionamiento por nodo (mín)	16	64	32
Direccionamiento por nodo (max)	256	128	64
Alcance tramo de fibra	10 Km ó 20 Km	20 Km	20 Km
Protocolo nivel 2	Ethernet	Ethernet over ATM (GFP) y/o ATM	ATM
Soporto tráfico TDM (voz. centralitas)	TOMolP	TOM nativo sobre ATM o TMOolP	TOM over ATM
Capacidad ascendente para tráfico IP	< 900Mbps	1 160 Mbps	500Mbps
Seguridad	DES	AES	AES

1.7 Principales ventajas de las redes PON

Las redes PON actualmente presentan grandes ventajas para la red vista desde el operador como la desde la perspectiva de acceso al servicio para los usuarios.

Como se ya se ha mencionado, la instalación de equipos pasivos en el despliegue hace que la red sea muy versátil y de rápido despliegue, el área de cobertura de esta tecnología puede alcanzar hasta 20 km permitiendo brindar a los usuarios grandes capacidades de ancho de banda; además no se ve afectada por campos electromagnéticos. Todo esto

redunda en menores costos de implementación si se las compara con enlaces punto a punto.

1.8 Aplicaciones soportadas por redes multiservicio sobre la base de redes PON

En la actualidad existen diferentes tipos de aplicaciones empresariales y residenciales que pueden ser soportados sobre la base de redes PON. Aplicaciones fijas en redes Multiservicios como son voz, datos y video. Servicios que a través de redes fijas, el usuario puede disponer de una gama de servicios como son por ejemplo: Transmisión de Datos, acceso a Internet, video bajo demanda, Centrex IP y telefonía Zip. Sin embargo una GPON es considerada como la base en la que se soportan diferentes esquemas de red multiservicios, es decir por ejemplo en un esquema de red de Transmisión con tecnología MPLS, una red GPON podría dar servicio a un nodo MPLS a través de un puerto OLT y una única ONT conectada hacia el Nodo MPLS que se pretende habilitar, así como también, podría dar el servicio de Transmisión para una Red de Radiobases LTE – 5G, donde se requiere gran ancho de banda para redistribuir mediante el acceso inalámbrico 5G. En [15] se propone que una red de acceso multiservicios debe integrar diferentes tecnologías como por ejemplo medición avanzada (AMI), lectura automática de medidores (automatic meter reading -AMR) y sistemas de gestión de energía.

Las redes multiservicios requieren elevados anchos de banda, sin que presenten problemas o restricciones, una red de cobre convencional de acceso no cumple estos requisitos; por su parte, una de las principales ventajas que ofrece una red GPON es la de adaptación a los requerimientos de las redes de nueva generación. Los usuarios requieren de arquitecturas de red que brinden servicios de calidad, por lo tanto es indispensable que las redes cuenten con nuevos elementos tales como servidores de aplicaciones y servidores de autenticación para el control de Calidad de Servicio (QoS). La identificación de los requerimientos de cada componente debe realizarse considerando aspectos tales como la calidad y acuerdos de nivel de servicio (SLA).

La importancia de una arquitectura de acceso que garantice los parámetros mencionados radica en la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías de fibra óptica hacia el hogar FTTH basadas en PON, considerando que las aplicaciones de nueva generación deben ser introducidas en una red sin provocar retardos importantes en el establecimiento por ejemplo de llamadas, video llamadas, acceso a servidores de datos, etc., como se puede observar en la Figura 8.

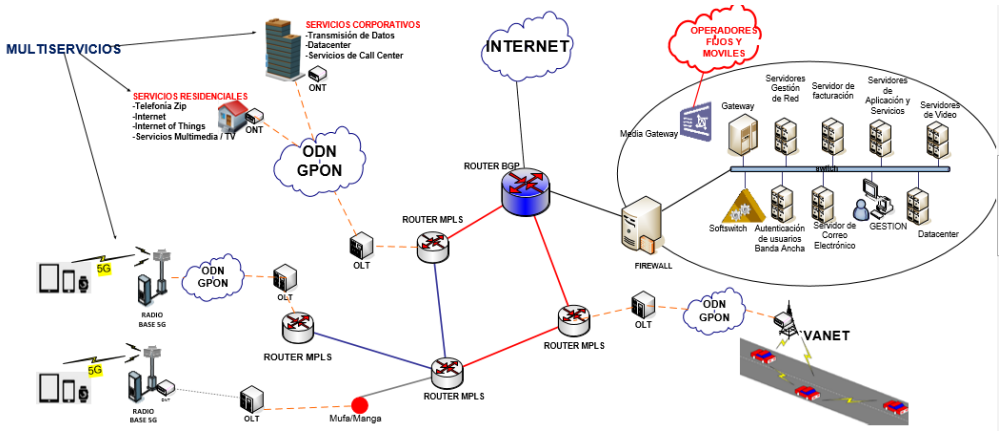


Figura 8. *Topología de Red Multiservicios soportada en Red GPON. Fuente. Autor*.

Tomando en cuenta que en nuestro medio se han implementado redes de nueva generación, donde los operadores públicos disponen de Softswitch, tienden al desarrollo de redes inteligentes [16] y las denominadas actualmente en investigación redes vehiculares (VANET) las mismas que son infraestructuras de redes que disponen de un gran número de terminales en este caso vehículos en movimiento o no; adicionalmente, dichas redes generan un alto tráfico de broadcast [17], para lo cual se hace necesario que sean soportados en su Backbone de transmisión por redes de alto acceso de trafico como son las redes PON.

1.9 Integración de redes PON

En la bibliografía se han identificado trabajos referentes a la integración de redes de acceso de banda ancha por medios ópticos con medios de acceso inalámbrico. Se buscan maneras de convergencia fija y móvil en áreas urbanas mediante la implementación de forma que los recursos no sean desperdiciados en una red de acceso y también en una red de datos no cableada, sin dejar de lado los posibles beneficios económicos que conlleve luego de su puesta a producción de las redes. Se necesitar;ia entonces, desde lo que interesa a un operador establecido, obtener una rentabilidad de un proyecto, de manera que basado por ejemplo en un plan de proyecto que siga un procedimiento como los recomendados por el Instituto de gestión de proyectos (PMI) que me permita dar seguimiento al cumplimiento de objetivos. [18]. La búsqueda de resultados óptimos tiene gran importancia en el despliegue de redes que soporten multiservicios; hay que considerar entre otros parámetros como por ejemplo: el dimensionamiento de la red, asignación de terminales a radio bases, validación de datos con el fin de justificar ganancias soportadas en el rendimiento de la red, reducción de costos, eficiencia en cuanto al espectro, escalabilidad y capacidad de facilitar diferentes servicios de telecomunicaciones tomando en consideración un acceso GPON [18].

Como se menciona en [19], una red GPON está desarrollada para brindar servicios de acceso óptico rentable con naturaleza de red de última milla punto a multipunto (P2MP) considerando que los clientes actuales requieren de un rápido crecimiento de ancho de banda. Estas redes están en capacidad de brindar alta velocidad y disponibilidad a sus usuarios considerando distintas maneras de implementación de enlaces de transmisión o última milla de fibra óptica, como por ejemplo, redes de fibra cuya implementación física sigue el proceso: armario externo o interno hacia edificios, hogares o usuarios.

Una red PON puede funcionar con varias combinaciones de tasas de línea asimétricas o simétricas como se mencionó anteriormente, por ejemplo en rangos de 155,52 Mbps a 2,5 Gbps, para adaptarse a cualquier situación operativa [20], tomando como parámetro importante el ancho de banda en mps que se alcanza por puerto y dependiendo las condiciones y distancias del enlace de cable óptico, es necesario identificar la posible ubicación de equipos pasivos de acceso. Bajo este parámetro considerable, convendría realizar y generar algún método algorítmico matemático que permita optimizar una red durante la etapa de planificación de redes de acceso de fibra óptica. En [21] se analiza el costo mínimo del árbol de expansión (spanning tree), muy usado en redes conmutadas o de switching (redes de computadoras de área local). Dado que la capacidad es limitada en los enlaces, produce un aumento a la capacidad mínima del árbol, el problema entonces se enfoca en establecer un valor mínimo denominado costo que se tiene entre nodos, o varios dispositivos de Capa 2 y 3 interconectados entre ellos, y que es expresado en la Ecuación 8, hacia el nodo 0, ahora mediante la Ecuación 9, representa la cantidad de flujo de datos a ser transportada tomando como inicio el nodo i y destino el nodo 0.

$$\tilde{I}, \tilde{I} = \{1, 2, 3, ...n\} \tag{8}$$

$$I = \tilde{I} \cup \{0\}.q_i, i \in \tilde{I} \tag{9}$$

Cada nodo presenta un máximo Q sobre la cantidad de flujo de datos, el mismo que debe ser administrado en una red interna; el valor de Q entonces corresponde al límite superior del flujo de datos que cada tramo de red puede transportar, sin perdidas por cabeceras, en [21] asumen que q_i es mayor que cero y menor que el limite Q, esto se muestra en la ecuación.

$$0 < q_i \leq Q \forall i \in \tilde{I} \tag{10}$$

En (11), C_{ij} corresponde al valor que nos cuesta para ir de enlaces desde el nodo i al nodo j, valor que debe ser mayor y distinto de cero y el valor de enlace o costo desde i a j es igual al de j a i, esto se muestra en

$$C_{ij} \geq 0 \forall (i, j)$$
$$y \qquad (11)$$
$$C_{ij} = C_{ji}$$

En la matriz *Cij*, el costo cumple con la conocida desigualdad del triángulo, por lo tanto la suma de los distintos o iguales costos de los valores del árbol generado por la eliminación de las aristas que unen los componentes hacia nodo central, no excede una capacidad máxima *Q* o restricción. Entonces el costo del árbol corresponde a la suma de los valores entre cada enlace con el objetivo de llegar hacia un destino.

En ciertos casos de topologías de árbol o malladas, se genera casos especiales por ejemplo cuando existen costos iguales por dos rutas, donde la restricción de capacidad se da como un borde en el máximo valor de dispositivos interconectados en el árbol; esto podría considerarse como que los valores de costos son iguales a uno. Basado en este tipo de problemas, se hace necesaria la aplicación de un modelo matemático para evaluar ubicaciones de posibles sitios candidatos de instalación de equipos activos y pasivos, basados en este tipo de metodologías.

La integración de redes PON requiere de un procedimiento matemático necesario de optimización, que permita realizar un despliegue de forma ordenada en el transcurso de los años horizonte planteados para el despliegue, según ciertas regiones o zonas de análisis con una cobertura preestablecida, que permita obtener los mayores beneficios para una Operadora de Servicios de Telecomunicaciones en función de la cantidad de potenciales equipos terminales que pretendan instalar mediante una proyección de demanda, una implementación debidamente planeada y justificada haciendo uso de un proceso que permita optimizar recursos con el único propósito de obtener una proyección lo más cercana a la realidad para el despliegue de una topología pasiva de Fibra Óptica.

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DE RED PROYECTADA Y PLANTEAMIENTO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

2.1 Ubicación de demanda proyectada existente en la localidad elegida

Para la ubicación de la posible demanda, la localidad o cantón elegido para el estudio ha sido considerado el cantón Gualaceo perteneciente a la provincia del Azuay. Dicho cantón cuenta aproximadamente con una población de 42.7 mil habitantes [22].

Este estudio se enfoca hacia la parte donde existe mayor volumen de usuarios existentes de Internet en el Cantón, considerando el número de conexiones existentes 94.184 para la provincia del Azuay [23], y considerando adicionalmente que es el segundo cantón más poblado después del Cantón Cuenca, aproximadamente el 33% del total de su población está localizada en el Área céntrica o urbana del Cantón Gualaceo.

En base a estas consideraciones se procede a ubicar los potenciales clientes en base a las líneas telefónicas existentes, aproximadamente el 55% del total de líneas pertenecientes al Operador CNT en el Azuay (sin considerar cantón Cuenca) y servicios de Internet que brinda esta Operadora de Telecomunicaciones establecida en dicho Cantón [24]. También como un parámetro adicional de consideración, cada potencial usuario dispone de un medidor de energía, el cual corrobora para ser un potencial cliente FTTH migrado de ADSL, considerando servicios a futuro como Televisión bajo Demanda, Señal de video por suscripción, servicios de Smart Grid y el Internet de las cosas, de gran importancia este último tema que está tomando gran desarrollo a nivel mundial en investigación y desarrollo de dispositivos.

En base a entrevistas realizadas a personal técnico encargado y a visitas en sitio en la zona de mayor demanda, se logra establecer la siguiente información de clientes existentes con servicio de Internet por medio de acceso en Cobre, los mismos que para nuestro estudio serán los potenciales clientes de Internet y de datos a través de medio de acceso en Fibra Óptica.

En la Tabla 3, se presenta una muestra de los datos correspondientes como se mencionó en el párrafo anterior a potenciales usuarios de red de acceso:

Tabla 3. *Listado de clientes actuales ADSL - potenciales a migrar a FTTH.*

CLIENTE POTENCIAL	LATITUD			LONGITUD		
ID PUNTO	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	2	53	23.5394439	78	46	48.5483795
2	2	53	23.7022301	78	46	48.5804306
3	2	53	23.7012125	78	46	48.0625512
4	2	53	23.1803091	78	46	47.966461
5	2	53	22.4966832	78	46	47.8706871
6	2	53	22.6262253	78	46	47.5467595
7	2	53	23.210182	78	46	46.6069648
8	2	53	23.9592786	78	46	46.8968166
9	2	53	24.3835662	78	46	47.5109758
10	2	53	24.3208943	78	46	48.7410661
11	2	53	22.630677	78	46	49.8124815
12	2	53	22.3686673	78	46	48.9714335
13	2	53	21.9462878	78	46	49.3282976
14	2	53	23.5394439	78	46	48.5483795
15	2	53	23.7022301	78	46	48.5804306
16	2	53	23.7012125	78	46	48.0625512
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
-	.	-	.	-	.	.
.	.	.	.	.	.	.
735	2	53	18.4210572	78	46	27.4870947
736	2	53	17.5124266	78	46	28.8159285
737	2	53	21.7432641	78	46	28.8400554
738	2	53	21.6487542	78	46	30.4262448
739	2	53	22.2685642	78	46	31.1694893
740	2	53	22.6231108	78	46	29.4209555
741	2	53	23.1163126	78	46	31.9770251
742	2	53	23.1494944	78	46	32.3006353
743	2	53	25.0973154	78	46	29.8369121
744	2	53	28.8961777	78	46	41.8702376
745	2	53	27.953661	78	46	42.5194236
746	2	53	27.9217533	78	46	42.8431616

747	2	53	27.6328636	78	46	44.8828819
748	2	53	27.4375966	78	46	44.8832618
749	2	53	27.6576401	78	46	40.9339884
750	2	53	28.4690229	78	46	39.799544
751	2	53	27.0170002	78	46	46.1464162
752	2	53	27.9198429	78	46	41.8721378
753	2	53	27.6328636	78	46	44.8828819

2.2 Ubicación de puntos geo-referenciados de clientes existentes en plano CAD.

Se procede a ubicar los clientes potenciales de red GPON (Figura 9), que actualmente están servidos mediante red de Cobre, datos obtenidos a través de Inspección y entrevistas a personal de una Empresa de Telecomunicaciones establecida. Los clientes han sido ubicados en un Plano Digital Geo-referenciado:

Figura 9. *Ubicación de clientes potenciales de Fibra Óptica - Gualaceo. Puntos de color verde.*

Para la aplicación de un Modelo Matemático de Optimización se ha considerado la división de 4 zonas de Alta Demanda, consideradas dentro de la zona urbana de la Ciudad de Gualaceo con el fin de obtener posibles ubicaciones del equipos activo y equipos pasivos de la red. Se ha considerado zonificar de esta manera, debido a que esta región segmentada es la zona de alta demanda donde se encuentran los potenciales clientes, sin embargo se podría separar en más regiones, según el tamaño geográfico de la cobertura requerida. De considerarse más divisiones, influirá en el proceso de optimización computacional.

En las siguientes gráficas se presenta una aproximación en plano CAD de las divisiones o regiones consideradas, que luego deberán ser contrastadas con los resultados del modelo, obteniéndose la misma cantidad de distritos o más, en función de los resultados:

Distrito 1. **Distrito 2.**

Distrito 3 **Distrito 4**

Figura 10. *Segmentación de posibles distritos de la zona de análisis.*

2.3 Levantamiento de red PON existente según Método de Observación en sitio y entrevistas.

De inspecciones realizadas y mediante observación y seguimiento de las redes de Acceso a través de cables de Fibra Óptica, así como entrevistas a personal técnico de la empresa CNT, se realiza el levantamiento del lugar de ubicación de la OLT y ubicación de divisores ópticos existentes. Durante la inspección en sitio y recorrido en la zona urbana, se verifica que las fibras ópticas que corresponden a Red de Feeder de la red GPON es una red dedicada únicamente para clientes PON, se verifica que existe red de fibra óptica punto a punto, donde existe una red paralela que corresponden a enlaces

de Fibra para clientes Corporativos, en el que se tiene varias bandejas (ODF) instaladas en la central de datos (Nodo) desde donde se abastecen a clientes con cables de Fibra Óptica directos de 6 hilos. Estos enlaces dedicados ocupan únicamente 1 o 2 hilos del cable para dar el servicio, puesto que se conectan de forma directa a un Switch de Distribución que abastece de servicio a través de conversores Eléctrico-Ópticos como se observa en Figura 11.

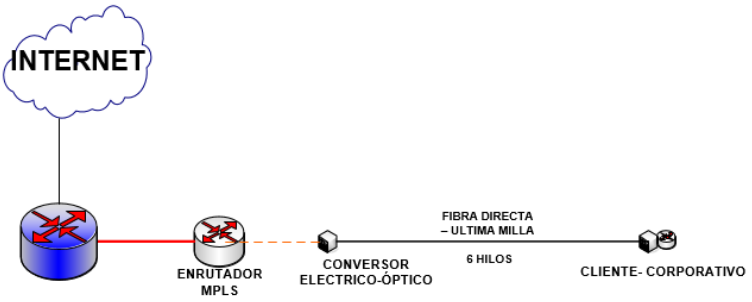


Figura 11. *Topología de Red de acceso-fibra óptica punto a punto y conversores eléctrico-ópticos.*

En cuanto a la red disponible se realiza el siguiente levantamiento de Información del diseño de red existente de última milla para servicios que se soportan en la Red PON desplegada actualmente, y que ha sido instalada considerando métodos empíricos de ubicación de Divisores Ópticos y equipos activos.

Se ha observado que la red dispone de armarios externos, donde se concentran los cables Feeder de la red de Fibra Óptica, tienen diferentes mufas instaladas durante el trayecto para desagregar hacia las cajas de distribución donde se encuentran los Splitters distribuidos. No es objeto de este estudio el análisis del número de mufas.

A continuación se indica en la Figura 12, una zona de distribución de divisores ópticos (Splitters) donde actualmente se brinda el servicio GPON, en la zona de análisis se puede verificar un gran despliegue de recursos pasivos para abastecer a los clientes potenciales, se confirma entonces la potencialidad del proveedor de red GPON en cuanto a su futuro crecimiento, sin embargo un posible desperdicio de recursos.

Figura 12. *Distribución de Divisores ópticos en una zona de muestra. Cantón Gualaceo*

2.4 Análisis de técnicas y métodos para proyección de clusters para el Modelo de Optimización.

2.4.1 Alternativas de Métodos de Agrupamiento para zonificación de usuarios.

2.4.1.1 Métodos de Agrupamiento.

Los distintos métodos de agrupamiento o clustering, constituyen un método de instrucciones para aprender por descubrimiento que es muy análogo a la inducción, un ejemplo es en el aprendizaje inductivo, un software aprende a clasificar objetos basándose en diferentes etiquetas asignadas por un profesor. En los métodos de agrupamiento no se suministran estos datos sino más bien se construye un programa que debe descubrirlas.

Se pueden plantear funciones matemáticas de densidad de probabilidad que suelen tener una moda o un máximo en una región [25].

Las distintas observaciones que se pueden realizar, tienden a juntarse en una zona de patrones que tienen cierta cercanía a la moda. Entonces los denominados procesos de agrupamiento tratan de analizar grupos de muestras adquiridas de cierto proceso de muestreo, a través del cual se genera cierta directriz de los patrones que puedan agruparse. Estas metodologías nos permiten reconocer y realizar una categorización, adjudicando cada dato observado a un grupo generado denominado cluster, manteniendo el objetivo que es de que cada grupo generado sea lo más parecidos y diferenciable. Entonces los clusters que se obtienen de un análisis por similitud reflejan un informe favorables el momento de poder generar índices para clasificación. Hay que considerar que si se necesita analizar grandes volúmenes de información es necesario

dividirlos manteniendo el concepto de "***divide y vencerás***". Se pretende entonces mediante estos métodos es demostrar la eficacia de los datos analizados así como las varias posibles variables seleccionadas [25].

Esto llamados métodos para agrupar información de muestras, corresponden un patrón a un grupo, basado en algún criterio de semejanza, donde las mediciones permitan ser aplicables para distintos patrones de datos. Frecuentemente se usan métricas de distancia para al análisis de volúmenes de información grandes, una de las más utilizadas es la conocida distancia euclídea [26], aplicada en varias investigaciones, especialmente la distancia normalizada y ponderada.

2.4.2 Algoritmos de Agrupamiento y Optimización

Para la definición de agrupamientos se debe considerar la dependencia de ciertos parámetros que pueden ser como ejemplo el algoritmo a ser usado, el valor asignado por parámetro y de la definición del método de medición de analogía que ha sido elegido para la ejecución.

Varios algoritmos de agrupamiento de jerarquía específica son aplicados en varias investigaciones de la ciencia, sin embargo cada uno varia si se decide usar una u otra función por la que se diferencian algoritmos directos cuya generación depende de aproximaciones heurísticas, así como algoritmos llamados indirectos (optimización).

La estructura general de un algoritmo iterativo de agrupamiento directo como se indica en [26], es la siguiente:

a. Elegir una porción de partida del conjunto de datos de K grupos.
b. Determinar los valores centrales del grupo.
c. Mientras que no se estabilicen los clusters…….
   Repetir
   -Crear un nuevo segmento, asignando cada patrón al grupo menos distante.
   -Determinar los centros de los grupos generados hasta este instante, hasta determinar un valor óptimo de la función
d. Mejorar el número de grupos al combinar y segmentar los grupos ya existentes o eliminando grupos pequeños o que están en el borde del área analizada.

Los algoritmos que son aplicados en problemas que se generan en los procesos cotidianos, y que necesitan de una simulación, hacen uso de heurísticas que sirven como técnica para resolver problemas complejos de optimización [27].

Entonces considerando lo anteriormente mencionado, esta aplicación de un proceso de agrupamiento de alguna manera se podrá mejorar o refinar mediante un esquema de grafos, donde se hace uso de un vector matricial de equivalencia con el fin de obtener agrupamientos diferentes. Sin embargo se debe de considerar que la mayoría de los métodos que usan grafos, consumen recursos de memoria considerables.

Algunas medidas de distancias utilizadas frecuentemente para los cálculos [26].

1. Distancia Euclidea:

$$d^2(X_i, X_j) = (X_i - X_j)^T \left(X_i - X_j \right) = \left\| X_i - X_j \right\|^2 \tag{12}$$

2. Distancia Euclidea Normalizada. En esta distancia los oeficientes correspondientes a las variable se normalizan considetando un intervalo entre [0,1] con el fin de que ciertas peculiaridades no influyan más en comparación con otras otras durante el proceso para el cálculo.

3. Distancia Euclídea Ponderada.

$$d_w^2(X_i, X_j) = \sum_{k=1}^{d} \frac{1}{\sigma_k^2} \left(X_{ki} - X_{kj} \right)^2 \tag{13}$$

4. Distancia de Mahalanobis.

$$r^2(X_i, X_j) = (X_i - X_j)^T \, C^{-1} \left(X_i - X_j \right) \tag{14}$$

Donde C^{-1} es la inversa de la matriz de covarianza.

2.4.2.1 Método Adaptativo

Es un algoritmo tiene una característica importante que es estar soportado en heurística. Este método puede aplicarse considerando que no se conozca a priori el número de clases de un problema donde se necesite aplicar. Sin embargo adicionalmente presenta claridad y validez, además que tiene como característica que las muestras son procesadas secuencialmente y de forma ordenada. Su comportamiento se encuentra alineado y depende del orden de presentación y supone conjuntos cerrados y espaciados por el resto, lo cual hace que no pueda ser aplicado a nuestro caso de estudio, dado que el primer procedimiento es escoger arbitrariamente los grupos. Entonces su procedimiento es simple, donde se determina un patrón a un grupo y se analiza si la distancia de dicho patrón hacia el centroide no supera cierto umbral que puede ser considerado o no como una restricción. También se debe considerar la aparición de

fenómenos inesperados, como el deslizamiento de ciclos en bucles al utilizar este algoritmo, el mismo que nos obligará a prestar mucha atención al comportamiento de un algoritmo adaptativo durante períodos de tiempo muy largos [28].

2.4.2.2 Algoritmo K-medias o K-means.

Es uno de los más conocidos y utilizados en problemas de ingeniería, debido a que es un método que agrupa heurísticamente conociendo como dato de entrada un determinado número de clases (K). Como nuestro caso de estudio es la maximización de beneficios o minimización de costos, se utiliza en el capítulo siguiente, ya que está enfocado el algoritmo en la minimización de distancias, para nuestro caso de estudio la optimización de la suma de los enlaces elevados al cuadrado de cada grupo referenciados al centroide ubicado por cluster.

Este algoritmo según lo investigado tiene mucha aplicabilidad en modelos de aprendizaje no supervisado y en general en ámbitos de ingeniería y economía donde se necesita modelos probabilísticos o estocásticos. Este algoritmo denominado K-means, permite analizar un conjunto de datos V de n puntos o vectores magnitud en un espacio conocido como euclidiano [29].

K-means se enfoca en la división de datos *V* en *K* subconjuntos que como se mencionó en párrafos anteriores se denominan clusters cuya notación o representación es $S_{1,\ldots\ldots,}S_{k,}$ que corresponden al conjunto que se quiere optimizar, su representación matemática seria como se indica en la Ecuación 15.:

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{v\in S_i}\left[\left\|v-c_i\right\|\right]_2^2 \qquad (15)$$

Donde $c_i = (1/\left|S_i\right|\sum_{v\in S_i} v$ corresponden a los centros del grupo denominado S_i. [29].

El algoritmo tiene una de sus principales características a nivel de eficiencia, pues requiere un almacenamiento mínimo de información, sin embargo, se restringe al orden de presentación de los agrupamientos, Éste parámetro *K* correspondiente a los subconjuntos ubica puntos en el espacio donde están ubicados los objetos que requieren de una clasificación. Estos objetos representan entonces los centroides iniciales de dichos agrupamientos, donde después éstos son situados al grupo cuyo centroide es el más cercano. Una vez determinados todos estos objetos, se podrá recalcular las posiciones de los *K* centroides, repitiéndose este proceso hasta que los centros sean ubicados y mantengan una determinada estabilidad. Esto produce una clasificación de los objetos en grupos que permite dar una métrica entre ellos.

Es este trabajo, este metodo ha sido considerado debido a su aplicación en problemas que requieren grupos que tienen parámetros similares como se mencionó anteriormente, generándose resultados que ayudan a comprender el comportamiento de grandes cantidades de datos, que nos permiten tener una visión clara de forma cualitativa y cuantitativa. Al ser un algoritmo que funciona de forma iterativa, segmentando de una manera óptima un conjunto inicial de datos en *K* clústers, el mismo que representará un parámetro, y considerando que dará como posibles resultados la minimización de una distancia mediante el uso de la llamada distancia euclidiana, nos permitirá entonces basado en lo mencionado aplicarlo a nuestro caso de estudio. A continuación se presenta el algoritmo general:

Condiciones Iniciales requeridas.

Número de clusters = C
Matriz de datos[ ] = N
Valores Iniciales de Clusters [ ] = V
Desde i=1….nuestro criterio de la distancia mínima
{
Calculamos la matriz de distancias
Calculamos la matriz de pertenencias
Calculamos la matriz de centroides
Fin
}

2.4.2.3 Algoritmo de set–cover

El problema del set–cover, es un problema que se puede dar en varias áreas de las ciencias como por ejemplo: ciencias de la computación, probabilidad y estadística. Consiste básicamente en poder identificar el menor número de conjuntos, cuya unión contenga a todos los elementos de un universo de análisis.

El problema del set–cover, se puede representar gráficamente a través de la utilización de un mapa, que representa el universo, las regiones que representan los conjuntos como se aprecia en la Figura 13. El universo se define como un conjunto de elementos del tipo {1,2…n}, donde pueden existir este tipo de conjuntos [30]

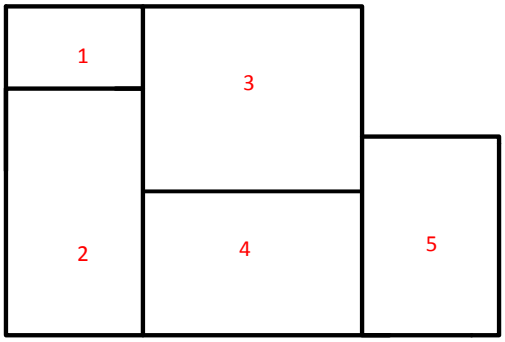


Figura 13. *Representación del problema set–cover dividido en 5 regiones.*

Entonces como se puede observar en la Figura 13, se hace la consideración de que el subuniverso formado por una familia de subconjuntos *S* del universo K, considerando que para nuestro estudio podemos decir que la región de cobertura de un equipo pasivo de fibra óptica será una derivación de S que será C (Cobertura), donde:

$$C \subseteq S$$

Para este ejemplo los datos serían los siguientes:

Universo: K= {1,2,3,4,5}

Conjunto: *S*={(1,2,3); (2,4);(3,4);(4,5)}

Entonces la unión de los conjuntos de *S*, tiene a todos los elementos de *K*. Pero se podría cubrir a todos los elementos con el conjunto {1,2,3}; {4,5}.

Partiendo con estos antecedentes, se puede plantear matemáticamente condiciones con el fin de poder definir un modelamiento matemático mediante una técnica de optimización, realizando un planteamiento con ciertas condiciones de borde restricciones, una función objetivo y el dominio para el problema, dónde podemos indicar que:

Dominio: Xi = {1 que corresponde a una habilitación cubierta por servicio o el valor de 0 que corresponde a la no instalación dentro de la región}

Función: Min $\sum_{i=1}^{5} Xi$

Restricciones:

$x_1 + x_2 + x_3 >= 1$ (16)

$x_2 + x_1 + x_3 + x_4 >= 1$ (17)

$x_3 + x_1 + x_2 + x_4 + x_5 > = 1$ (18)

$x_4 + x_2 + x_3 + x_5 >= 1$ (19)

$x_5 + x_3 + x_4 >= 1$ (20)

Entonces se podría plantear que para el problema del conjunto de cobertura:

La matriz: $A = (a_{ij})$ de m filas y n columnas que se muestra en la Tabla 4, es una matriz de unos y ceros conocida como matriz dispersa.

Tabla 4. *Ejemplo de Matriz Dispersa en set–cover*.

	Columnas										
Filas	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**.**	**.**	**n**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	0
3	0	0	0	0	0	**1**	0	0	.	.	0
4	0	**1**	0	0	0	0	0	**1**	.	.	0
5	0	0	0	0	0	0	**1**	0	.	.	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	.	.	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	.	.	0
8	0	0	**1**	**1**	0	0	0	0	.	.	**1**
9	**1**	0	0	0	1	0	0	0	.	.	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	**1**
m	0	0	**1**	0	0	0	**1**	0	0	0	0

Se asume que la columna j cubre a una fila *i* si a_{ij} =1

Cada columna *j* tiene asociado un costo no negativo $C_{j.}$

Filas I={1 hasta n) y columnas j = {1 hasta m}

El problema de set–cover requiere como datos un subconjunto de costo Min $S \subseteq I$

De modo que cada fila $i \in I$, es cubierta por una columna $j \in S$. El modelo matemático para la Función Objetivo de este caso de ejemplo sería la presentada en Ecuación 21:

$$\nu(\text{Set Cover Problem}) = \sum_{j \in J} c_j x_j \tag{21}$$

que está restringido a la Ecuación 22:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1; \forall i \in I, x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \tag{22}$$

donde $x_j = 1$ si $j \in S$, y $x_j = 0$ para otros casos.

Entonces para este ejemplo, las soluciones que se podrían encontrar se podrán representar mediante un arreglo binario donde cada una de sus filas representará las restricciones y variables del problema.

2.4.2.4 Algoritmo de Dijkstra

Es uno de algunos algoritmos más utilizados para poder realizar la búsqueda de caminos más cortos o de peso mínimo, para poder ir desde uno de los vértices dados, representado con una unión de dos enlaces en un grafo hacia el resto de los vértices.

Este algoritmo al ser ejecutado devuelve solo el peso mínimo encontrado dentro de un grafo, lo cual mediante este valor permite obtener de forma eficiente y rápida el camino más corto. En base a esta afirmación este algoritmo es uno de los más utilizados en varias ramas de la ciencia.

El ejecutar este algoritmo permitirá ir censando todos los caminos más cortos encontrados que parten del vértice donde se inició hacia los demás vértices que forman parte del grafo.

El procedimiento estándar para ejecutar este algoritmo es el siguiente:

a. Obtenidas los datos de ubicación de potenciales usuarios, se enceran e inician todas las distancias de un grupo de datos, asignándole un valor infinito, como si fuese un circuito abierto, pues durante la primera iteración

de la búsqueda del camino más corto, el costo o distancia es desconocida al principio, excepto la del nodo *X*, nodo donde inicia, que se debe colocar en 0.

b. Se considera un valor de nodo como actual y se inicia non la generación de la tabla correspondiente.

c. Se procede a recorrer todos los nodos directamente conectados al nodo padre.

d. Se analiza la distancia comprendida entre un nodo cualquiera que est';e directamente conectado al nodo padre, y se procede a colocar su valor en la tabla, para los nodos que no están directamente conectados la distancia al primer nodo se suma.

e. Se marca como completado el nodo *a*.

f. Se continúa con el procedimiento de algoritmia, ahora tomando como punto de inicio nuevo el que tiene el menor peso en la Tabla generada, y se procede a direccionar al paso c.

Entonces, su conjunto de vértices lo representamos como: $V=\{\upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3, \upsilon_4, \ldots. \upsilon_n\}$
Y su conjunto o matriz de pesos lo representamos por $\lambda=(\omega_{i,j})_{nxn}$
Y consideramos a "*X*" como el vértice inicial.
Para nuestro caso como ejemplo, se muestra en la Figura 14, una representación en Grafo con los vértices y pesos o costos de enlaces entre vértices:

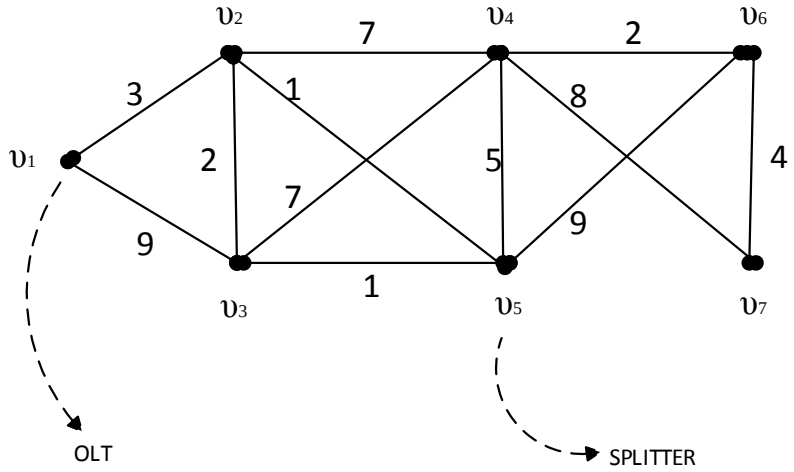


Figura 14. *Ejemplo gráfico para la aplicación del Algoritmo de Dijkstra*

Después que se termine de ejecutar el algoritmo, los valores de la tabla generada vectorialmente mediante filas y columnas, suponemos que estará completa, como se muestra a continuación en la Figura 15 y Tabla 5:

Tabla 5. *Valores de matriz inicial. Algoritmo de Dijkstra***.**

λ	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7
v1	0	3	9	∞	∞	∞	∞
v2	3	0	2	7	1	∞	∞
v3	9	2	0	7	1	∞	∞
v4	∞	7	7	0	5	2	8
v5	∞	1	1	5	0	9	∞
v6	∞	∞	∞	2	9	0	4
v7	∞	∞	∞	8	∞	4	0

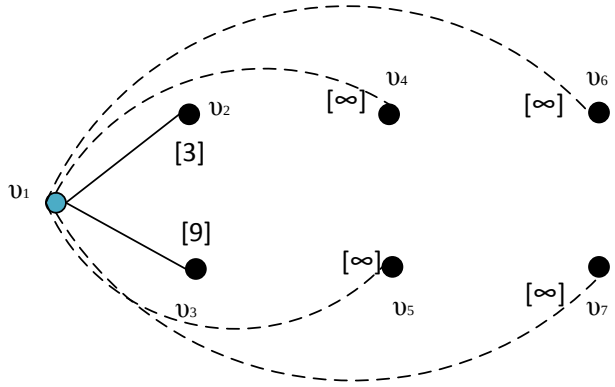


Figura 15. *Primera Iteración del Algoritmo de Dijkstra para determinar distancias mínimas*.

Sin embargo el algoritmo tiene que llegar a una convergencia, pues para el caso rutas entre nodos por ejemplo 1 a 3, su enlace más corto no corresponde posiblemente al que está directamente conectado, sino que luego de analizar el grafo la distancia de menos costo sería por el 2, por lo que su tabla o matriz de vectores tendría que ejecutar una actualización [31].

Una vez finalizado el algoritmo se obtiene una matriz de valores enteros, donde se tenga un valor hacia cada nodo definido, mostrándose de forma gráfica en la Figura 16:

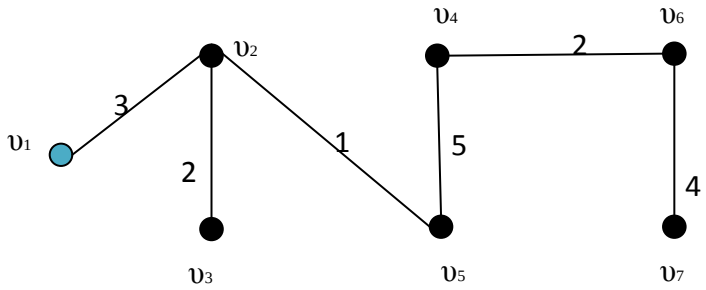


Figura 16. *Representación gráfica de la n-esima iteración de Dijkstra para determinar distancias mínimas*.

En nuestra aplicación planteada para el despliegue de Red de acceso de fibra óptica, se aplicara este algoritmo para poder determinar la ruta mínima de enlace de fibra óptica para poder habilitar un divisor óptico.

2.4.2.5 Algoritmo de Cristalización Simulada (Simulated Annealing)

Este algoritmo es usado para la resolución de problemas de optimización combinatoria debido a que la metaheurística desarrolla una disposición, que se establece en un algoritmo de programación, que permite un beneficio considerable al poder de alguna manera evadir los valores de óptimos locales. Es una técnica muy utilizada desde hace más de treinta años para resolver los problemas de modelado matemático de optimización.

Su generación está relacionado en sistemas termodinámicos, se compara con la función de costo que debe ser evaluada para una solución válida de un problema matemático de optimización combinatoria. Entonces lo que pretendemos encontrar mediante su aplicación es evolucionar de un estado a otro de menor costo. Hay que considerar que la permutación de un estado metaestable, se puede alcanzar mediante la inserción de ruido con valores que dependan de un parámetro, matemáticamente una función parame trizada de control que en ciencia como la Termodinámica nos permite relacionarla con la temperatura. Si se procede a disminuir mediante un criterio adecuado este parámetro, permitiría, con un grado de exactitud valorable, que un sistema termodinámico por ejemplo pueda alcanzar un mínimo global de energía. Entonces este algoritmo de Cristalización Simulada, teóricamente es un algoritmo de búsqueda mediante diferentes entornos, que seleccionan posibles candidatos mediante un procedimiento aleatorio.

2.5 Determinación de la geometría y metodología para ubicación de equipos activos y pasivos.

En la determinación de la geometría nos basaremos en la ubicación de los puntos geo-referenciados, los mismos que se ubicarán mediante un proceso de agrupamiento el cual se basa en *K*-means o *K*-medias, el cual en una primera instancia se puede determinar el número de k agrupamientos y se asume el centroide de esos grupos. Los centroides pueden determinarse tomando de forma aleatoria *K* objetos o puntos como centroides iniciales o tomar los primeros *K* puntos de forma secuencial.

La primera fase es poder determinar los centroides iniciales en función del número de cluster definido que para nuestro caso corresponderían a *n* clusters o distritos generales con el fin de ubicar posibles ubicaciones de posibles sitios candidatos de instalación de Splitters, adicionalmente se necesita determinar la distancia de cada objeto (cliente) con relación al centroide, y posteriormente agrupar la cantidad de objetos o clientes con base a la distancia mínima encontrada.

Se ha considerado segmentar en 70 sitios candidatos la zona de análisis basados en un criterio de observación y posibles distancias para las acometidas, de la cantidad de posibles usuarios ubicados en el plano CAD. Se genera un Grafo G(L,V) done L representa los enlaces y V los vértices del grafo, ubicándose el punto de sitio candidato que luego se procede a mover al punto más cercano de la red o poste más cercano para

ubicación real considerando que no se sobremonten unos a otros. Se presenta a continuación el pseudocódigo para la ubicación de Splitters.

PSEUDOCODIGO-GRAFO GEOREFERENCIADO

Paso 1. Cargar Grafo Georeferenciado G(L,V)

$V_k=\{V_1,V_2,V_3,,,,V_n\}$

$E_k=\{E_1,E_2,E_3,\ldots E_n\}$

#Iteración=1

K==1

Paso 2. Clusterizar/Dividir zonas en 70 Cluster

Inicia N=0, hasta N=70.

Paso 3. Ubicar Splitter en cada Centroide

Distrito P{ V_1,V_2..... Vp}

Clusterizar sub-zonas

Ubicación de splitter →Centroide en cada Zona

Zona de ubicación → $M\{S_1^1, S_1^2, \ldots\ldots S_M^P\}$

Paso 4. Mover ubicación determinada al nodo más cercano del Grafo → G(L,V)

Paso 5. Tomar regiones 7 distritos, ubicación total de splitters por sub-región

Paso 6. Topología de ubicación lista. END.

Entonces la ubicación de los puntos obtenidos de cada cliente, se convertirá de su coordenada Geográfica a un par ordenado de componentes x, y como se puede observar en la Figura 17, dónde los valores iniciales van a ser los puntos centroides (puntos color rojo) de los K clusters que se podrían generar del grupo de clientes dentro de cada agrupamiento.

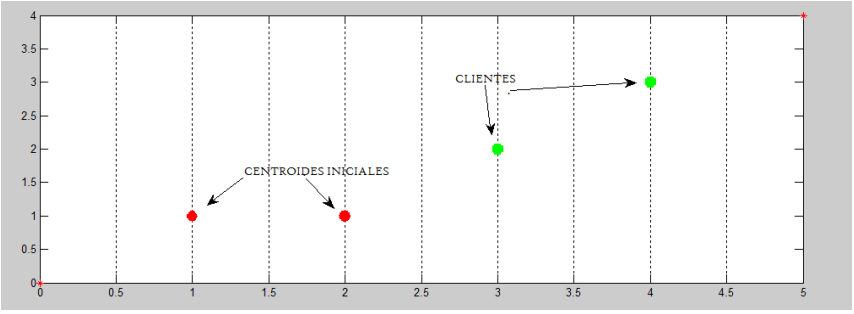


Figura 17. *Ubicación de pares (x,y) de clientes y Centroides en Matlab.*

Entonces al levantar la geometría de cada uno de los puntos es decir determinar la distancia de cada cliente a un centroide se puede calcular mediante la siguiente notación:

$$D_{ij} = (\sum_{j=1}^{n} (X_{i,j} - X_{k,j})^2)^{1/2} \quad (23)$$

Entonces por ejemplo la distancia entre un punto (3,2) y un centroide o nodo master de partida seria:

$$\sqrt{(3-1)+(2-1)}$$

Siguiendo este mismo procedimiento la primera matriz de distancias resultaría la siguiente:

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.73 & 2.23 \\ 1.41 & 2 \end{pmatrix}$$

El procedimiento se repite (*n* iteraciones) hasta ubicar los nuevos centros o distancias mínimas desde cada objeto o cliente hacia el nuevo punto considerando clusterización o división en diferentes regiones o subregiones de análisis donde los objetos cubren ese dominio (Figura 18).

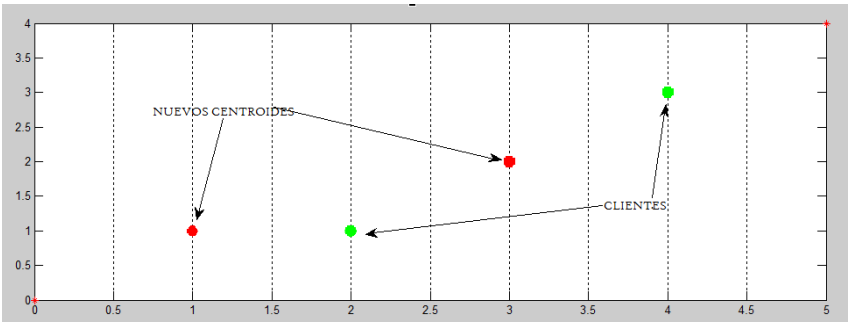


Figura 18. *Ubicación de pares (x,y) de clientes y cambio de centroides.*

Luego de la ubicación como se mencionó anteriormente, se toma el dato del centroide y se procede a mover al nodo más cercano del grafo.

2.6 Identificación del modelo de optimización, variables de entrada, variables de salida y restricciones.

Para la implementación del modelo matemático, se utilizará el algoritmo de set–cover para determinar los sitios candidatos donde se tendrían que colocar los Splitters (70 unidades) que se definen por las agrupaciones o definición de clúster de clientes en base a un levantamiento de clientes proyectados. Este levantamiento de regiones de agrupamiento será aplicado en función de las regiones de construcción por año.

El algoritmo de **set–cover** también nos servirá para poder definir las acometidas desde los diferentes Splitters hacia los potenciales usuarios considerando un radio pre-definido de 150m y una capacidad de puertos por Splitter de 64.

El algoritmo de **Dijkstra** nos servirá para la definición de la red primaria, es decir el tramo de planta externa desde la OLT hacia los diferentes Splitters proyectados.

Se plantea la definición de un Modelo Estocástico Multietapa, es decir la planificación de construcción considerando la mejor alternativa para red de distribución y acceso al usuario, ya que este tipo de implementaciones tienen una característica de requerir de una gran inversión inicial, como la compra de varias OLTs, la adquisición de equipos activos, equipos pasivos, y la construcción de una Red de Fibra Óptica de Planta Interna y Externa. Como el tiempo de construcción es muy largo dependiendo la localidad y los tramos que pueden ser aéreos o subterráneos, la capacidad de reacción frente a posibles diferentes escenarios no previstos es casi nula, considerando que existen parámetros que pueden generar incertidumbre y se resuelvan mediante planteamientos de optimización estocástica de múltiples etapas [32].

2.6.1 Movimiento Browniano Geométrico (MBG)

Antes de dar una definición sobre MBG, recordaremos que el término estocástico se utiliza para definir una variable que puede ser aleatoria pero no necesariamente estocástica, considerando que la variable aleatoria también es dependiente del tiempo. Entonces el MBG es un proceso aleatorio que describe cómo se comportan ciertas variables aleatorias conforme pasa el tiempo. El MBG describe un proceso estocástico en el que el logaritmo natural de una variable aleatoria sigue un proceso Wiener generalizado es decir en el que los cambios en la variable durante períodos breves de tiempo están normalmente distribuidos con una media y una varianza que son proporcionales al plazo de tiempo en consideración.

Estos procesos estocásticos pueden ser utilizados por ejemplo para modelar el comportamiento de los precios por un servicio de telecomunicaciones a lo largo del tiempo y, por lo tanto, forman la base para muchos modelos de valoración estocástica.

El MBG entonces es un proceso estocástico, continuo en el tiempo que tiene dos propiedades, la primera que es considerado un proceso de Markov, lo que se traduce en que los valores resultantes de una variable de estado poseen una característica de distribución de probabilidad, que depende de los valores actuales, no le interesa los valores anteriores, y la segunda característica respecto a los cambios que pueden generarse en un intervalo no abierto de tiempo, que generan una probabilidad de distribución normal.

Matemáticamente esto se conceptualiza de la siguiente manera, en su definición básica de Movimiento de Wiener o Browniano [33].

Si z(t) es un MB, y Δz el cambio producido durante un intervalo, entonces Δt debe cumplir las siguientes condiciones:

I. La relación de ambos incrementos está dado por la ecuación:

Donde ε_t es una variable con distribución Normal de media igual a cero, y con desviación estándar igual a 1.

II. ε_t no está correlacionada en el tiempo: $E[\varepsilon_t\ \varepsilon_s]=0$, para instantes donde $t \neq s$. Lo que es equivalente al procedimiento realizado por un proceso de Markov con incrementos no dependientes.

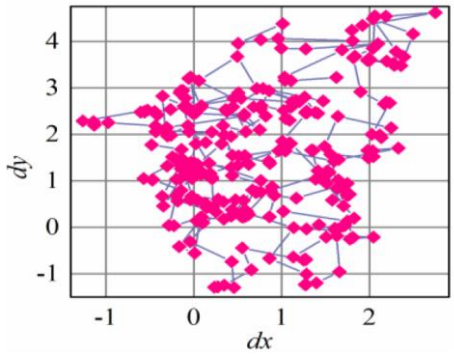


Figura 19. *Ejemplo de representación luego de análisis mediante Movimiento Browniano alrededor de 300 iteraciones de una partícula que genera múltiples rutas. Fuente.* [34]

A través de esta metodología, se generarán distintos escenarios de proyección, los cuales servirán para poder determinaran el mejor camino (path) en un escenario de decisión, este término es definido para poder elegir la opción más óptima dentro de un gráfico que muestra múltiples paths. Estos escenarios corresponden a cuantos nodos hay en cada etapa de tiempo, en nuestro caso de estudio llamados periodos. Los escenarios son

generados con datos de ingreso-clientes y haciendo uso del movimiento browniano, cuyas observaciones basadas en su concepto por ejemplo, si se observara mediante algún dispositivo la trayectoria de una partícula, considerando que es randomica y que se encuentra en un fluido, es una de las primeras formas cuyos resultados transportaron hacia las primeras mediciones científicas de lo que hoy conocemos como masa del átomo. En el caso particular de nuestro trabajo nos servirá de modelo matemático para los distintos procesos con características aleatorias, generados por la posible variación e incertidumbre presente en la proyección de clientes.

2.6.2 Variables de entrada, variables de salida y restricciones.

Para la definición de variables se debe considerara que se utiliza o reutiliza la insfraestructura existente de posteria y canalización de forma que se pueda minimizar los costos de inversión (CAPEX) que puedan derivarse por la instalación de un poste nuevo o la construcción por obra civil de canalización.

Lo que pretende el modelo a ser planteado es minimizar Costos de Capex y Opex, y buscar una maximización de beneficios para el operador de telecomunicaciones. Entonces consideramos el despliegue de una Red de fibra óptica que facilite la escalabilidad horizontal de la infraestructura dentro del cantón de análisis.

Se plantea la aplicación de un problema de incertidumbre debido a la demanda proyectada que crece según los años horizonte de un proyecto de red, y considerando como se aplica en [35] un proceso de programación estocástica multi-etapa MILP y que es considerado un problema de complejidad NP-Hard [35]. También dentro de MILP está involucrado el problema de Máxima Cobertura Presupuestado (MCP) cuyo objetivo es seleccionar conjuntos de F de tal manera que el peso de los puntos o pares ordenados que para nuestro caso corresponden a potenciales usuarios, cubiertos por estos conjuntos sea máximo.

Basados en el crecimiento de usuarios en la zona de análisis del cantón Gualaceo, el modelo matemático de optimización es considerado para la planificación no empírica del posible despliegue de una red de acceso PON, debidamente bien estructurada, planificada y escalable en tiempo y espacio de forma automatizada. Este planteamiento le permitiría a un operador de servicios de telecomunicaciones lograr alcanzar máximas ganancias considerando una inversión necesaria con un mínimo riesgo en CAPEX para un buen despliegue de red, sin desperdicio ni subutilización de recursos y manteniendo la calidad de servicio exigida por el ente de regulación y control estatal.

Entonces se inicia el planteamiento de variables considerando determinar en un instante de tiempo dentro de los años horizonte del proyecto, por ejemplo el crecimiento estocástico de los usuarios, en este instante de tiempo estarán también involucrados varios recursos de la red de acceso PON. Esta consideración es importante dentro del

análisis, puesto que la demanda se debe plantear como una taza de crecimiento que depende del número de usuarios por periodo, es decir esta población son potenciales clientes que se verán beneficiados por los servicios soportados en el despliegue funcional de la red de acceso PON. Cuando esta tasa de crecimiento pasa de un tiempo t_c hacia un t_{c+1} en donde por diferentes cambios y/o variaciones, por ejemplo nivel de ingresos en el usuario final u otras circunstancias relativas al potencial cliente, que influya en un cambio de la demanda proyectada creando un posible nivel de incertidumbre para la toma de decisiones empresariales, se hace necesario generar y aplicar un modelo de optimización matemático que permita de alguna manera obtener escenarios para medir los riesgos y beneficios con el fin de realizar un despliegue óptimo de una red de acceso.

2.6.2.1 Datos de Entrada.

Para generar los datos de entrada al modelo de optimización que será planteado, se ha previsto la generación de un Árbol de proyección Estocástica Multietapa (MSPT) [35] que se ha generado con los datos disponibles de demanda ver Figura 20, para lo cual a sido seleccionado un método estocástico que nos permitirá programar en base a esta demanda, para este planteamiento cuya elección como se mencionó anteriormente, se ha elegido el Movimiento Browniano, donde la principal consideración es el grado de incertidumbre cuya reducción de escenarios nos representa realidades con poca o excesiva demanda, tomando en cuenta que desde el primer periodo horizonte se deben considerar alternativas con niveles de incertidumbre.

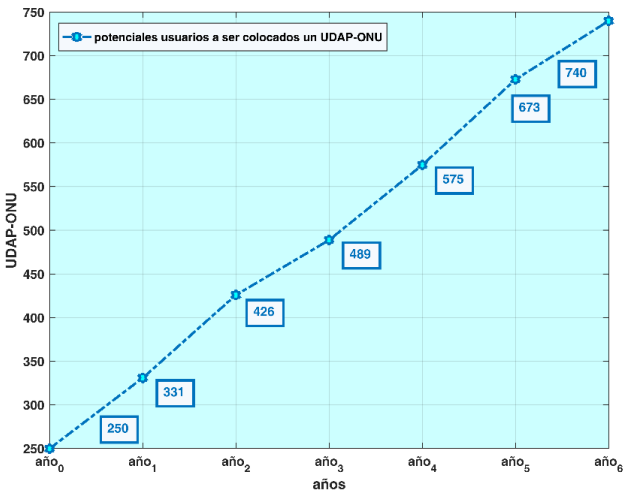


Figura 20. *Potenciales Usuarios a ser colocados una ONT*

El modelo buscará adaptarse a la realidad que se genera al instalar o puesta a punto de una red PON previamente comisionada en su aspecto físico, iniciando en un año o periodo cero, e ir probando diferentes sitios candidatos de instalación de Splitters

conforme se incrementa la demanda, buscando la geometría de ubicación de estos equipos pasivos.

Los periodos horizonte o etapas de tiempo considerados para el modelo son 7, como caso de ejemplo, los mismos que pudieran cambiar, se plantea como datos iniciales los Costos Referenciales, como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. *Datos de Ingresos y Costos referenciales para Cálculos en el modelo de Optimización.*

Ingresos y Costos Referenciales		
Ingreso Promedio Anual x UDAP	$	240.00
CAPEX SPLITTER	$	5,000.00
OPEX SPLITTER	$	200.00
CAPEX Fibra Óptica x [metro]	$	10.00
OPEX Fibra Óptica x [metro]	$	1.20
Tasa de Descuento Anual		9.57%

No es objeto de este estudio realizar un análisis de recuperación de inversión, sin embargo se plantean datos referenciales lo más cercanos a la realidad en nuestro medio que servirán para la aplicación del modelo matemático planteado.

Se procede a obtener información de cada nodo n, del proceso de programación estocástica multietapa, que debe considerarse para el Modelo de Optimización. En cada intervalo de los periodos del proyecto al aplicar MSPT, se debe considerar que se pasa de un estado con ciertas condiciones a otro $s \to s'$ [36], y considerando que este cambio de estado debe estar condicionado según la probabilidad siguiente:

$$\mathbb{F}_r(s' \mid \mathrm{s}, \mathrm{c})$$

Donde c, representa posibles acciones que pueden reflejarse en la red con posible despliegue, y considerada en cada nodo del MSPT, expresado como:

D{d(n1), d(n2), ..., d(nk)} (24)

Que tendrían que devolver los beneficios que se esperan, considerando que estos representan también una medida de riesgo e incertidumbre que se presentan durante la planeación de cualquier proyecto que implique toma de decisiones.

Adicionalmente se debe considerar que el despliegue en cada nodo generado por el árbol de proyección estocástico, devolverán luego de la aplicación del modelo, cuantos

Splitters se necesitan por cada etapa de tiempo y la posible distribución de red, tanto primaria como de distribución o dispersión.

2.6.2.2 Datos de Salida

Lo que se busca con el modelo de optimización a ser aplicado, es determinar la mejor manera de planeación de una red de acceso PON a desplegarse considerando el manejo de un alto grado de incertidumbre. Las salidas obtenidas del árbol de decisión permitirá determinar puntos importantes, llamados de quiebre para toma de decisiones, donde nuevas actualizaciones se irán presentado en la red para cada nodo del MSPT. También es importante indicar que los datos de salida son dinámicos, puede realizarse una re-planeación desde el año o periodo posterior al de inicio, es decir año 2, 3 etc. Entonces los datos de salida para toma de decisiones serán:

a. Puntos de quiebre o de análisis de los periodos planteados para el proyecto vs. usuarios proyectados.
b. Determinación de los mejores sitos candidatos de ubicación de una OLT
c. Determinación de los mejores sitios activos donde se ubicaría un Splitter.
d. Determinación de los usuarios cubiertos por cada uno de los Splitters respetando el criterio de capacidad máxima de los mismos. (64 puertos por Splitter como máximo)
e. Obtener cuál de los escenarios MSPT es el más factible en base al análisis de toma de decisiones.

2.6.2.3 Restricciones Generales

Los valores de contorno a establecerse en el modelo están relacionadas con:

-Capacidad constructiva (10 Splitters por cada etapa de tiempo)
-Cantidad de clientes soportada por OLT y por Splitter
-Área de cobertura para última milla (<= 2km)
-Los Splitter y enlaces de fibra óptica no se destruye en la etapa de avance del proyecto, se mantienen.

2.7 Obtención de la función objetivo que será optimizada (máx)

A continuación se procede a plantear los elementos de [35] que sirven para la definición de la función Objetivo.

Conjuntos.

$\mathbb{V} \rightarrow$	Conjunto de vértices
$L \rightarrow$	Conjunto de enlaces (links)

$\mathbb{A} \subseteq \Re^3 \rightarrow$	Área de planificación – Cobertura en regiones o distritos de Planta Externa
$\mathbb{C} \in Z \rightarrow$	Conjunto de Splitters candidatos para cobertura

Escenario de árbol

$\mathbb{N} \rightarrow$	Conjunto de nodos en el escenario de simulación realizado con MSPT
$p(n) \in \mathbb{N} \rightarrow$	Nodo padre de *n* en MSPT
$P(n) \in (0,1] \rightarrow$	Probabilidad en el nodo *n*

Parámetros y coeficientes

$\mathcal{M} \in \Re \rightarrow$	Número suficientemente grande mayor a la cantidad de flujos
$\mathrm{K}^n \in Z \rightarrow$	Límite de construcción por periodo de tiempo en el nodo *n*
$\alpha^n \in [0,1] \rightarrow$	Valor requerido como parámetros para el requerimiento de cobertura
$\mathbb{W}_j^n \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Coeficiente de peso sobre un pixel *j* y corresponde al nodo *n*
$I_j^n \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Ingresos generados por pixel *j* en el nodo *n*
$C_i^{capex,n} \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Costo capital para la OLT *i* en el nodo *n*
$C_i^{opex,n} \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Gasto de Operación para la OLT *i* en el nodo *n*
$D_{p,q}^n \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Conjunto de distancias de los enlaces $p \rightarrow q$ en el nodo *n*
$C_{p,q}^{capex,n} \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Costo del enlace $p \rightarrow q$ en el nodo *n*
$C_{p,q}^{opex,n} \in \Re_{\geq 0} \rightarrow$	Gasto de Operación del enlace $p \rightarrow q$ en el nodo *n*

Variables de decisión

$Y_i^n \in [0,1] \rightarrow$	Splitter i activo en el nodo n.
$\mathrm{Os}_j^n \in [0,1] \rightarrow$	ONT j que es servida por una OLT activa en el nodo *n*.
$\mathbb{Z}_{p,q}^n \in [0,1] \rightarrow$	Enlace $p \rightarrow q$ está activo en el nodo *n*
$\mathcal{C}^n \in [0,1] \rightarrow$	Cumplimiento de cobertura en nodo *n*

2.7.1 Función Objetivo.

$$\max.: \sum_{n\in\mathbb{N}} P_{(n)}\{\sum_{j\in\mathbf{A}} I_j^n Os_j^n - \sum_{i\in\mathbb{C}} (C_i^{capex,n}(Y_i^n - Y_i^{p(n)}) + C_i^{opex,n} Y_i^n)... \\ ... - \sum_{(p,q)\in L} (C_{p,q}^{capex,n} D_{p,q}^n (\mathbb{Z}_{p,q}^n - \mathbb{Z}_{p,q}^{p(n)}) + C_{p,q}^{opex,n} \mathbb{Z}_{p,q}^n)\} \quad (25)$$

Las consideraciones para esta función objetivo como se plantea en [35], donde es aplicada para redes híbridas Fiber-Wireless (FiWi), se puede también plantear para este caso de estudio aplicado a FTTH, entonces se considera que los enlaces de fibra óptica que son seleccionados de un grafo $\mathbb{G}(\mathbb{V},\mathbb{L})$ levantados mediante una grilla de calles, pertenecientes al área de cobertura denotada por $\mathbb{A}$, si un enlace se activa para el estado s perteneciente al nodo n del MSTP, la variable $\mathbb{Z}_{p,q}^n$ estará en 1, o por el contrario adquiere el valor de cero.

Entonces todos los links que fueron seleccionados pasan a formar parte de la red PON en topología de árbol, cuyos tráficos de datos bidireccionales, se realizan entre las ONT y las OLTs.

Necesitamos adicionalmente analizar la ubicación de los equipos pasivos, considerando que para nuestro caso se ha planteado un rango de cobertura de distancia práctico de 150 metros, y considerando que el rubro de inversión es alto en CAPEX para estos elementos, al igual que lo correspondiente a trabajos como fusiones, habilitaciones, instalación de mufas, etc, que corresponden al campo pasivo de despliegue de red PON. Esto como fuente de entrevista realizada a personal técnico de la región de aplicación del modelo. Este procedimiento es considerado un problema No Trivial.

Entonces si un enlace $\mathbb{Z}_{p,q}^n$ de fibra óptica es seleccionado en un nodo padre *p(n)* en el MSTP se mantiene en este estado hasta cuando cambia de $t_c \rightarrow t_{c+1}$. El modelo MILP buscará entonces poder lograr el máximo beneficio que todo operador busca mediante una inversión inicial, durante el despliegue de la red de acceso PON, expresado mediante la Función Objetivo planteada (Ec. 25), elementos de los cuales se describen en los términos siguientes para un mayor entendimiento:

- $P_{(n)} \rightarrow$ Probabilidad $P_{(n)}$ de cada nodo MSPT
- $\sum_{j\in\mathbf{A}} I_j^n Os_j^n \rightarrow$ Ingresos que se generan por los servicios de telecomunicaciones prestados a los usuarios que se encuentran activos Os_j^n en cada nodo MSTP.

- $\sum_{i\in\mathbb{C}}(C_i^{capex,n}(Y_i^n - Y_i^{p(n)}) + C_i^{opex,n}Y_i^n) \rightarrow$ Costos de CAPEX y OPEX de los Splitters activos en cada nodo del MSTP.
- $\sum_{(p,q)\in L}(C_{p,q}^{capex,n}D_{p,q}^n(\mathbb{Z}_{p,q}^n - \mathbb{Z}_{p,q}^{p(n)}) + C_{p,q}^{opex,n}\mathbb{Z}_{p,q}^n) \rightarrow$ Esta sumatoria corresponde a los costos de CAPEX y OPEX por metro de fibra óptica que contiene el enlace o enlaces $\mathbb{Z}_{p,q}^n$ que están activos en cada nodo de MSPT.

2.7.2 Restricciones en la Función Objetivo

R1. La siguiente función tiene que garantizar que cada usuario tenga servicio y cobertura de un Splitter.

$$\sum_{i\in C} Y_i^n \geq Xs_j^n \rightarrow \forall n \in \mathbb{N} \tag{26}$$

R2. Las siguientes ecuaciones evitan que los Splitters, y enlaces de fibra óptica sean destruidos de los nodos padre hacia los nodos hijos en el MSPT. El nodo principal (padre) inicial en el MSPT se representa mediante las variables $Y_i^{p(n)} = 0 \wedge \mathbb{Z}_{p,q}^{p(n)} = 0$

$$\begin{aligned} &Y_i^n \geq Y_i^{p(n)} \rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, i \in C \\ &\mathbb{Z}_{p,q}^n \geq \mathbb{Z}_{p,q}^{p(n)} \rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, (p,q) \in L \end{aligned} \tag{27}$$

R3. En esta restricción se limita el número de equipos pasivos divisores que pueden adicionarse a las ya existentes desde el nodo padre.

$$\sum_{i\in C}(Y_i^n - Y_i^{p(n)}) \leq K^n \rightarrow \forall n \in \mathbb{N} \tag{28}$$

R4. Esta restricción controla que la cobertura planeada sea garantizada sobre el área de planeación $\mathbb{A}$ haciendo uso de los parámetros α^n, los coeficientes $\mathbb{W}_j^n$ y la variable $\mathcal{C}^n$.

R5. Esta estricción debe controlar la cobertura por parte de los equipos pasivos del problema MILP.

$$\sum_{j \in A} \mathbb{W}_j^n Xs_j^n \geq \alpha^n \left| A \right| \mathcal{C}^n \tag{29}$$

R6. En esta restricción se asegura una sola ruta que cursa tráfico desde los m equipos ONT hacia las OLT a través de un enlace de fibra con la mínima distancia.

$$\sum_{q|(p,q) \in L_p^{out}} \mathbb{Z}_{p,q}^{n,m} - \sum_{q|(p,q) \in L_p^{in}} \mathbb{Z}_{\mathrm{q,p}}^{n,m} = \mathbb{R}_{p,i} Y_i^n \quad \text{dónde}$$

$$\mathbb{R}_{p,i} = \begin{cases} 1, si \rightarrow i = OLT \\ -1, si \rightarrow i = m \\ 0, si \rightarrow i \neq OLT \wedge i \neq m \end{cases} \tag{30}$$

R7. Esta restricción hace que se cumpla que los enlaces activos se correspondan con cada uno de los m flujos.

$$\sum_{m \in F} \mathbb{Z}_{p,q}^{n,m} \leq M \mathbb{Z}_{p,q}^n \rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, (p,q) \in L$$
$$Y \in \{0,1\}^{\mathbb{N}xC}, Xs \in \{0.1\}^{\mathbb{N}xA}, \mathbb{Z} \in \{0.1\}^{\mathbb{N}xLxF}, \mathcal{C} \in \{0,1\}^{\mathbb{N}} \tag{31}$$

CAPÍTULO 3

3. APLICACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN EL DESPLIEGUE DE LA RED PARA LA REGIÓN DE PLANEACIÓN

3.1 Aplicación del modelo de optimización MILP (Programación Lineal Entera Mixta).

La programación lineal se divide en dos grupos, programación entera Mixta (PEM) y programación entera pura (PEP). En nuestro caso de aplicación y generación de la función objetivo, se ha visto un enfoque hacia MILP que es a donde se alinea las características de nuestro caso de aplicación del modelo de optimización, que considera variables de decisión entera o binaria. De esta forma un problema de MILP puede considerarse como un modelo híbrido pues considera la composición de variables enteras y variables continuas (características de los modelos de Programación Lineal).

Entonces basado en esta descripción anterior se plantea el modelo como un problema de optimización matemática lineal entera mixta con restricciones, como se detalló en el capítulo 2.

Considerando un modelamiento computacional estocástico, que permite hacer una descripción de los rasgos del comportamiento de la demanda en los periodos de tiempo definidos, permitirá realizar el modelamiento de la función objetivo definida mediante MILP.

Los resultados que den las simulaciones sobre este tipo de modelos estocásticos son los que se emplean entonces en la planeación.

El enfoque metodológico con el que se plantea la función objetivo para la simulación, es mediante un modelo estocástico, no determinista, la diferencia es que el determinista nos puede ayudar a determinar o medir eficiencia técnica, sin considerar otras posibilidades, mientras que un estocástico [37], nos ayuda a determinar eficiencia técnica, asignación de recursos o algún otro parámetro importante para el despliegue de una red PON de Fibra Óptica, en presencia de incertidumbre, además de mirar y tratar al problema desde diferentes opciones y puntos de vista.

3.2 Algoritmos a ser utilizados en la solución del problema de optimización

Los escenarios que involucran procesos estocásticos, para nuestro problema de aplicación o caso de estudio sobre el cantón Gualaceo, se puede considerar como un problema cuya complejidad es computacionalmente intratable, debido a que el problema crece exponencialmente en función del número de usuarios o grafos que se generan, de donde se obtienen los distintos sitios candidatos. Dada la combinatoria utilizada, en nuestro caso 70 sitios como dato inicial, la solución es, como se pueden agrupar estos conjuntos, por eso se busca el análisis mediante metaheurísticas.

Lo que se pretende es optimizar los parámetros importantes en un despliegue de red física, entonces la optimización ha sido planificada como se mencionó en el Capítulo 1 y 2, mediante parámetros para aplicar al modelo y que generen escenarios para análisis y obtención de resultados como se representa en la Figura 21:

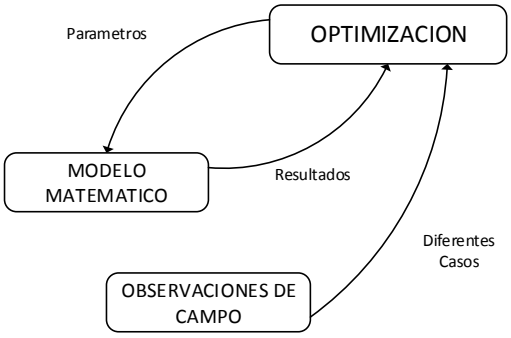


Figura 21. *Proceso del Modelo de Optimización***.**

Lo que se busca es la obtención de un óptimo global, como se podría representar en la siguiente Figura 22, donde se puede entender lo que se proyecta, es minimizar, mediante la utilización de MILP:

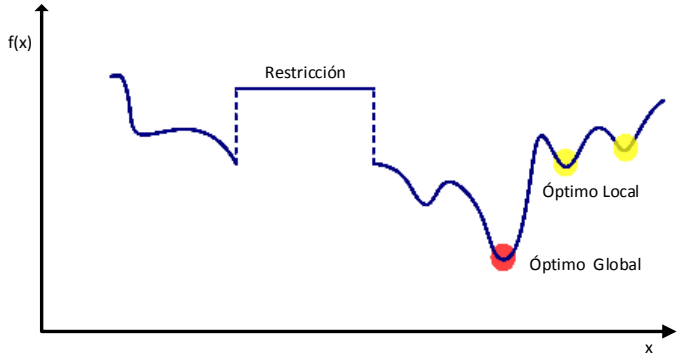


Figura 22. *Proceso del Modelo de Optimización.*

En nuestro caso utilizamos el Algoritmo Simulated Annealing (SA) o Cristalización simulada, el cual como se mencionó en el Capítulo 2, es un procedimiento algorítmico de búsqueda meta-heurística, aplicable en nuestro caso para el problema de optimización global, entonces nuestro objetivo es determinar una aproximación al valor más óptimo de nuestra función, considerando que el espacio de búsqueda de este valor es completamente randómico.

Lo que se va a simular es entonces una optimización heurística, mediante un modelo matemático que consiste en buscar puntos óptimos u optimización de nuestra función objetivo, sujeto a ciertas restricciones que ya fueron planteadas. Dado que para poder resolver la Función, es necesario considerar que este caso es real, por lo que se recurre al uso de este algoritmo debido a las múltiples variables, de forma de obtener soluciones factibles que aproximen a la mejor de todas las encontradas.

Se procede a utilizar este tipo de algoritmo heurístico que pueden dar como resultado soluciones satisfactorias y resolverá el problema en un tiempo computacional razonable.

Aplicamos este algoritmo sobre nuestra Función Objetivo, que pretende realizar una optimización heurística y realizar una búsqueda local, por lo que partimos de una solución cualquiera, la que puede ser modificable infinitesimalmente para pasar a otra solución las cuales definen un conjunto de soluciones dentro de cierta región de planeación, partiendo de una solución inicial como se puede verificar en la Figura 23.

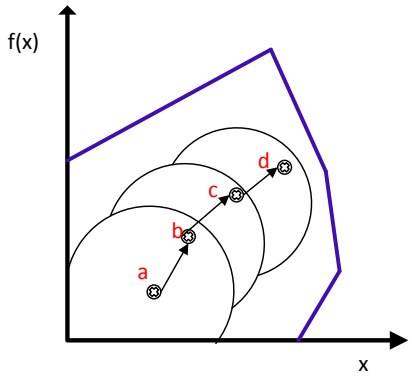


Figura 23. *Proceso-Conjunto de soluciones dentro de una región de planeación.*

Cabe indicar que el termino annealing del algoritmo empleado, se referencia a la termodinámica, donde corresponde por ejemplo a dar un baño térmico que serviría para obtener estados de baja energía en un sólido metálico, para lo cual el enfriamiento debería ser muy lento pues las partícula tienen que recolocarse en el estado de mínima energía. Como caso de ejemplo en lo relacionado a nuestro problema de Optimización con la termodinámica, se correspondería como sigue en la Tabla 7:

Tabla 7. *Comparativa conceptual del algoritmo Simulated Annealing. Termodinámica-Problema de Optimización.*

En termodinámica	**En el problema de Optimización**
Configuración	*Solución factible*
Configuración Fundamental	*Solución Óptima*
Energía	*Costo*
Temperatura	*Parámetros de control del Algoritmo*

Este algoritmo es entonces un algoritmo que realiza una ejecución de exploración en diferentes ambientes computacionales, seleccionando candidatos de manera randómica y admitiendo soluciones degradadas que dependen de una probabilidad.

Se procede a presentar un esquema estándar, donde se muestra el funcionamiento del algoritmo. Las iteraciones se organizan en distintos bucles dependiendo de la aplicación. En una iteración por dar un ejemplo se puede examinar datos con el objetivo de restringir un valor *Z*, y en otra iteración intentará encontrar una posible solución o rango siempre con el mismo dato de *Z*.

Algoritmo Estándar - Simulated Annealing

Main

x=x$_o$ *% solución actual que es igual a la inicial,*
xb= x$_o$ *% mejor solución iguala la inicial*
T=T$_o$= *%temperatura igual a la inicial*

While *%mientras el criterio de parada se mantenga*
Do
V=solución vecina de x elegida de forma aleatoria

$\Delta c = c(v) - c(x)$ *% donde x es sol. Actual y v es sol. vecina*

Si $\Delta c < 0$

Then *%la solución vecina v mejora la actual x.*

x=v

si $c(v) < c(\mathrm{x}_b)$

then $\mathrm{x}_b = v$

else x=v con probabilidad $e^{-\frac{\Delta c}{T}}$

$T = \alpha T$ *% reducir la temperatura según coeficiente*

return

En esta Tesis, específicamente para nuestra región de aplicación del modelo de optimización, se procede a levantar la grilla o malla de trabajo según el mapa geo-referenciado de manera de poder luego levantarlo en el Programa Matlab, haciendo uso de la herramienta para el manejo de mapas, donde se muestra el primer esquema inicial en la Figura 24.

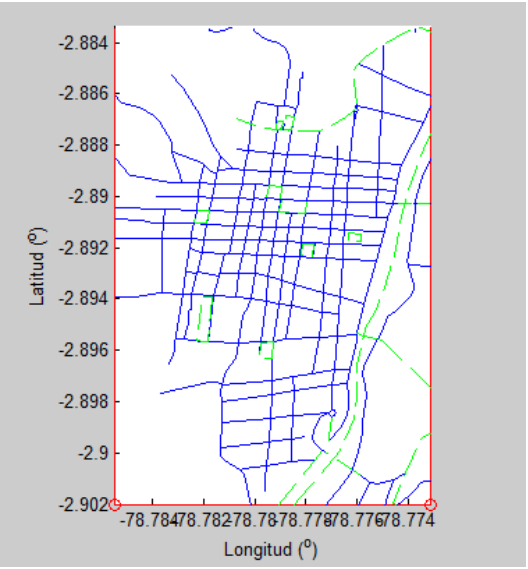


Figura 24. *Grilla-Malla geo-referenciada y levantada en MATLAB de la región de Aplicación - Gualaceo*

Los algoritmos utilizados en la solución del problema de optimización han sido los siguientes:

- Algoritmo de Movimiento Browniano (generar escenarios).
- Algoritmo reducción de escenarios (software GAMS^{IDE}-tool Scenred)
- Algoritmo de set–cover Modificado (agrupa clientes servidos por un Splitter).
- Algoritmo de Dijkstra Modificado (generar trayectos de fibra óptica).
- Algoritmo de Simulated Annealing (busca la mejor solución de un conjunto de soluciones factibles).

3.3 Generación de escenarios y análisis de resultados.

Los diferentes *paths*, se generaron utilizando el Algoritmo con Movimiento Browniano, donde se utilizó mediante un análisis estadístico de los datos deterministas (empíricos), y se obtuvo una taza de crecimiento anual de 0,23 y una volatilidad de 0,05. La tasa de crecimiento fue calculada como una variable dependiente de *t*, siendo el tiempo, en periodos, la cual se ha expresado como X_t, y un periodo siguiente como X_{t+1}.

Entonces, como nuestro interés es encontrar la tasa de crecimiento de una variable, se debe tomar su logaritmo natural y luego la derivada de este logaritmo a través del

tiempo. Como se considera nuestra variable X que crece de una manera exponencial, se deduce a lo siguiente:

$$
\begin{aligned}
X &= X_0 e^{g_x t} \\
InX &= InX_0 + g_x t \\
g_x &= \frac{d(Inx)}{dt} \\
g_x &= \frac{In(X_{t+1} / X_t)}{\Delta t}
\end{aligned}
\tag{32}
$$

Donde g_x es nuestra tasa de crecimiento que puede ser anual, por lo que obtenemos:

$$
g_x = \frac{In(X_{t+1} / X_t)}{\Delta t} \tag{33}
$$

Con estos elementos incluido la volatilidad (0.05) hace que el modelo sea no determinista, más bien inserta lo que se conoce como incertidumbre, se procede a levantar el MSTP donde se generan alrededor de 21 nodos distribuidos en 7 periodos, aplicando escenarios de reducción [38], cuya generación del árbol reducido son los datos de entrada para el modelo algorítmico de optimización, considerando que uno de los aportes de esta tesis ha sido generar los escenarios aplicados al modelo de aplicación de despliegue de redes GPON con una demanda establecida, dando como resultado la Figura 25.

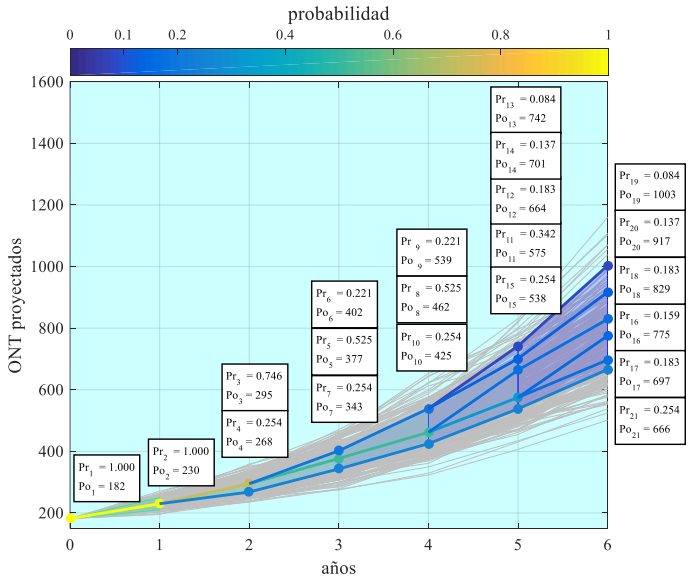


Figura 25. *Árbol de Proyección. ONT –UDAPs Proyectados vs Probabilidad*

Sin embargo como se indicó en la Figura 20, se muestra el escenario de crecimiento determinista o empírico.

Para los escenarios de optimización que se obtienen mediante la aplicación del Modelo matemático, fueron utilizados los algoritmos de set–cover y dijkstra modificados para generar los paths de fibra y la distribución de usuarios a los Splitters, controlando la capacidad y el radio de cobertura de la acometida.

Los resultados arrojaron que se obtiene un 14,76% más que haber realizado la planeación con un método determinista o empírico.

En la Figura 26 se resaltan las mejores políticas versus el máximo beneficio esperado, resultantes luego de aplicar el algoritmo Simulated Annealing, conjuntamente con los algortimos de set–cover modificado y Dijkstra modificado,. El algoritmo elije una solución inicial y va realizando la evolución. Entonces se puede mencionar que es el "performance" del proceso algorítmico de optimización, los cuales se han resaltado las cinco más importantes:

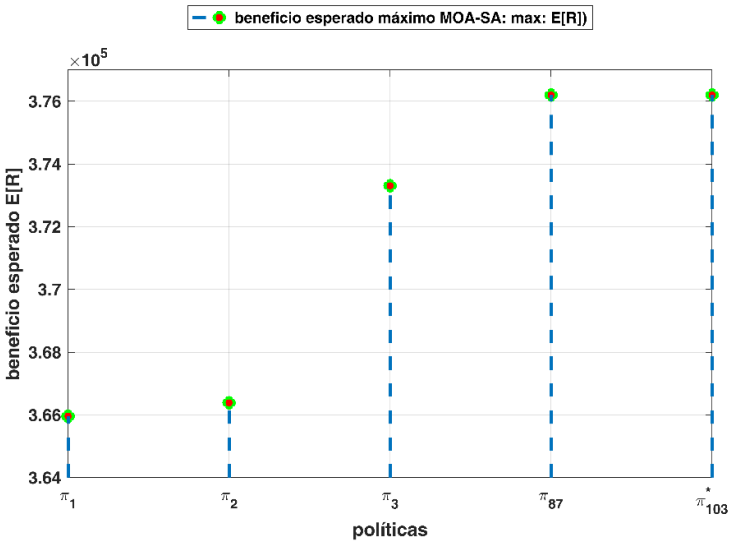


Figura 26. *Beneficio Esperado vs políticas generadas*

Cabe indicar que el gasto computacional, considerando que toda la región urbana de la Ciudad de contiene alrededor de más de 1000 nodos, se ha considerado dentro de la zona de aplicación de esta Tesis aproximadamente 400 nodos. Bajo esta consideración el algoritmo toma alrededor de 48 horas generar resultados, utilizando una máquina de 8 núcleos, 2,6 GHz de velocidad de procesador y una GPU. Este tiempo es considerado

sobre una base de 103 iteraciones, donde ofrece el máximo beneficio esperado, cada iteración representa una política.

Entonces en la gráfica se representan los máximos beneficios esperados, se puede mencionar que en términos económicos, estos son los indicadores para proyectos de inversión en el área de telecomunicaciones, que representa el valor presente neto del flujo de caja, en nuestro caso dado por la Función Objetivo.

3.4 Comparación de la red planeada de forma determinista vs. Resultados obtenidos con el modelado matemático MILP.

3.4.1 Ubicación de OLT y Splitters con modelo Determinista.

En las siguientes Figuras 27 y 28, se indica la ubicación de equipos pasivos (Splitters) de crecimiento de red. Se puede verificar el incremento de equipos y enlaces de Fibra

Óptica para poder cubrir la demanda de clientes. Como los datos han sido tomados de clientes en producción, la OLT ya se encuentra instalada en el sitio, como se muestra en la Figuras.

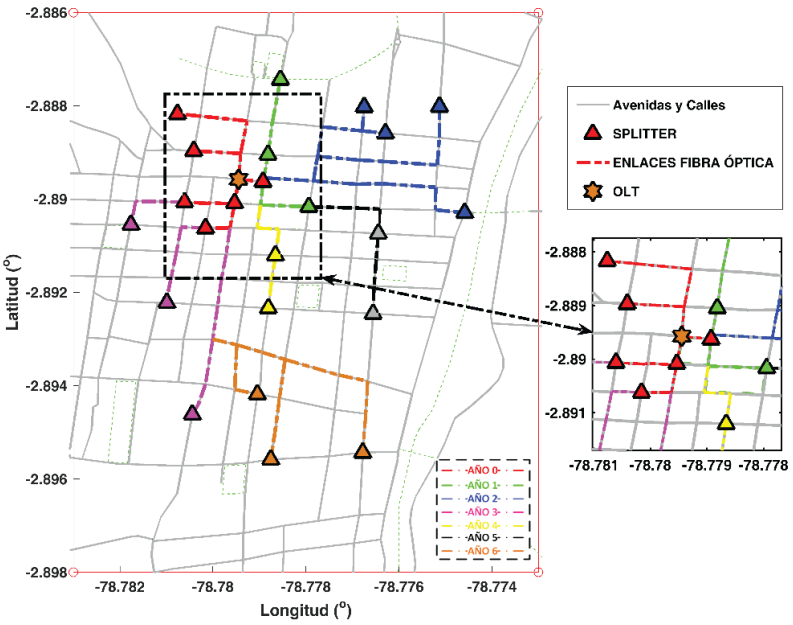


Figura 27. *Ubicación de equipos pasivos – Modelo Determinista*

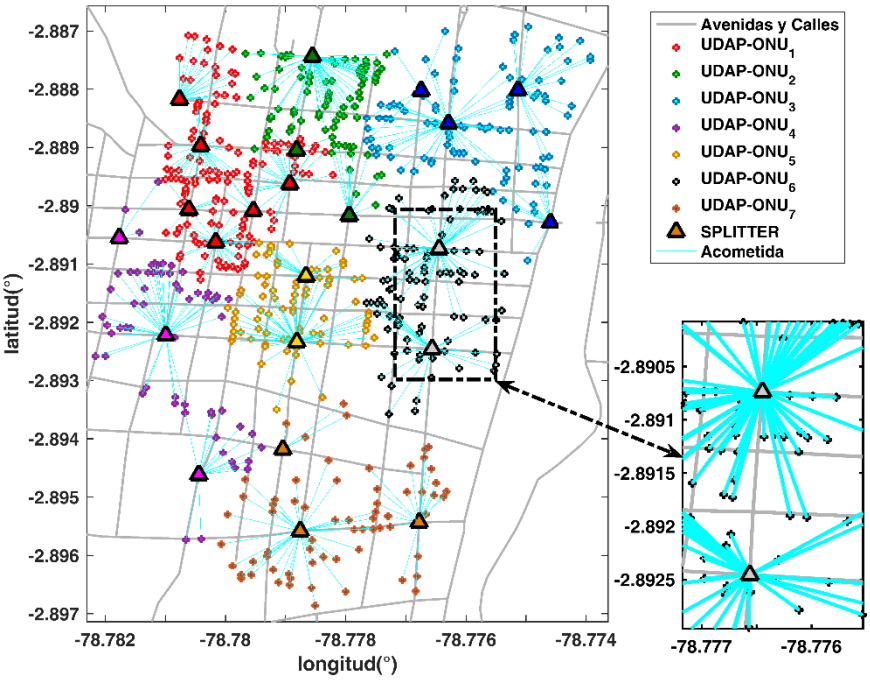


Figura 28. *Ubicación de potenciales clientes con su Nodo Splitter de servicio más cercano. Modelo Determinista.*

3.4.2 Gráfica y Cuadro Comparativo

En la Figura 29, se realiza de forma gráfica la comparación de un modelo determinista que es realizado mediante las mejores prácticas experimentales, criterios técnicos y metodologías de procedimientos empresariales versus la planeación objetivo de esta tesis considerando un modelo de optimización estocástico. La grafica representa la escalabilidad horizontal de la red de Fibra Óptica respecto a los equipos ONT y representado adicionalmente mediante un valor porcentual.

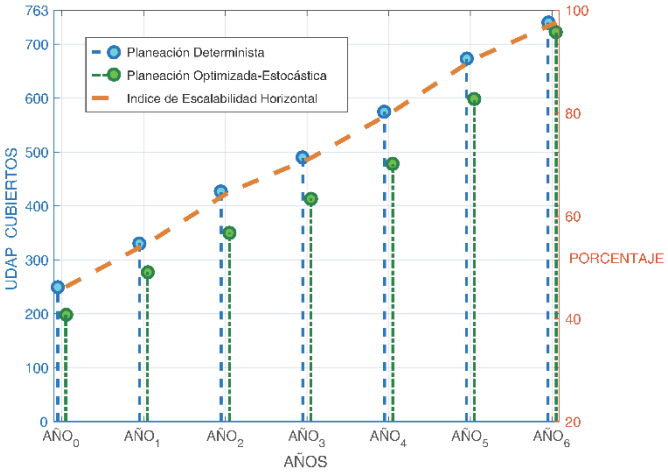


Figura 29. *ONT cubiertas por año de planeación. Índice de escalabilidad Horizontal.*

En la Tabla 8, se dan a conocer los resultados obtenidos mediante el modelo matemático estocástico en comparación con el modelo determinista:

Tabla 8. *Datos del modelo determinista y el modelo Estocástico de Optimización***.**

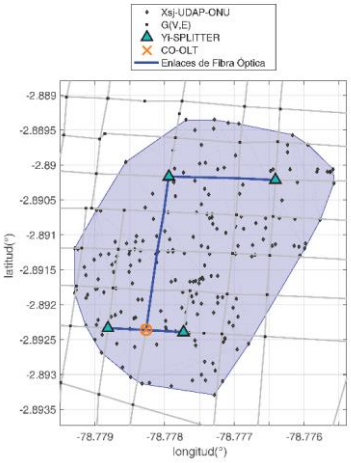
Resultados deterministas sin utilizar herramientas de optimización

Año	$año_0$	$año_1$	$año_2$	$año_3$	$año_4$	$año_5$	$año_6$
UDAP-ONU cubiertos	250	331	426	489	575	673	740
Splitters-capacidad máxima [1x64]	6	9	13	16	18	20	23
Enlaces-Fibra Óptica x [m]	775.64	1193.43	2502.43	3374.45	3672.50	4092.50	5049.77
Beneficio esperado en tc	-$ 32,756.4	$ 15,240.1	$ 4,766.8	$ 5,305.2	$ 4,212.6	$ 2,276.8	$ 955.0
VPN	**$ 329,581.6**					**TIR**	**121%**

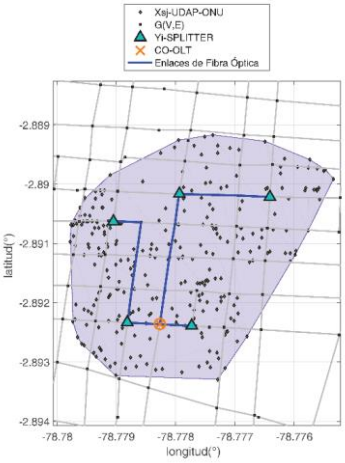
Resultados estocásticos del Escenario 2 del MSPT dados por MOA-SA

Nodo MSPT-año	n_1-$año_0$	n_2-$año_1$	n_3-$año_2$	n_5-$año_3$	n_8-$año_4$	n_{11}-$año_5$	n_{17}-$año_6$
Probabilidad nodo MSPT	1	1	0.7457	0.5248	0.5248	0.3417	0.1825
UDAP-ONU cubiertos	198	277	350	414	478	599	722
Splitters-capacidad máxima [1x64]	4	5	6	7	8	10	13
Enlaces-Fibra Óptica x [m]	538.42	780.63	1078.10	1307.50	1616.10	2028.00	2791.00
Beneficio nodo MSPT	-$ 32,864.2	$ 51,483.9	$ 45,198.5	$ 35,266.8	$ 37,255.6	$ 26,798.1	$ 15,032.6
Beneficio esperado en tc	-$ 32,864.2	$ 51,483.9	$ 60,612.1	$ 67,200.5	$ 70,990.1	$ 78,425.9	$ 82,370.5
VPN	**$ 378,218.7**					**TIR**	**130%**

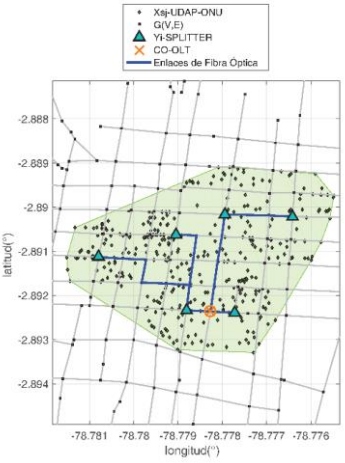
Las siguientes Graficas corresponden a la solución de la topología del mejor escenario resultante del MSTP que generó el escenario dos, que representa cómo se tendría que construir la red de acceso de Fibra Óptica GPON, se resalta que en el año sexto también se han incluido las acometidas de cada Splitter:



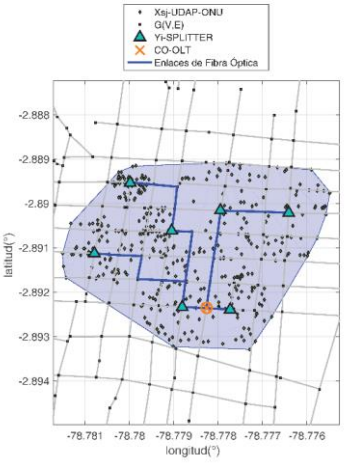
Periodo 0



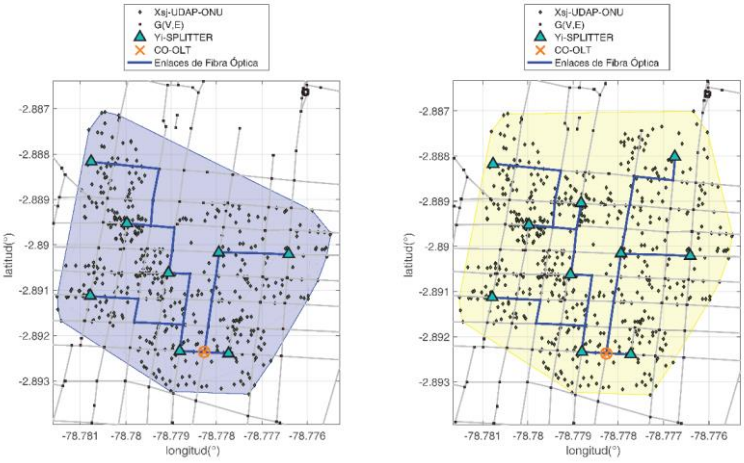
Periodo 1



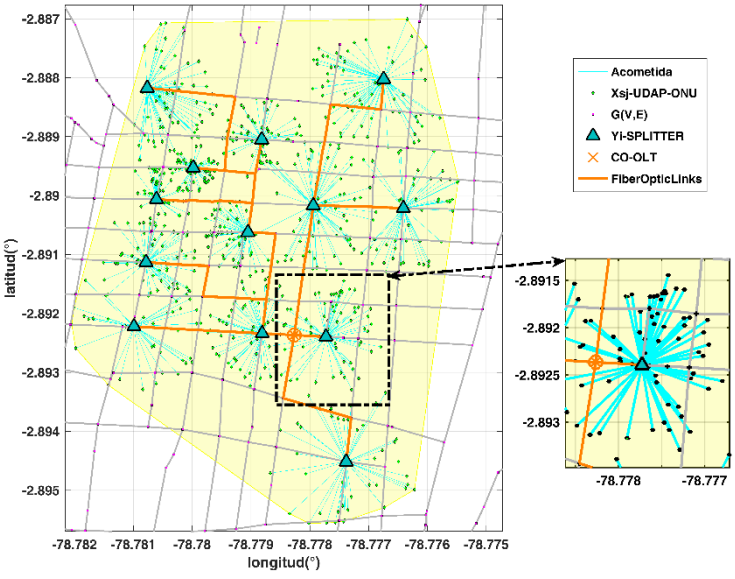
Periodo 2



Periodo 3



Periodo 4 **Periodo 5**



Periodo 6

Figura 30. *Graficas generadas luego del Modelo de Optimización por periodo de crecimiento de Demanda y Total.*

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES

4.1 Aportes de la tesis

En la presente Tesis se desagregan una serie de conclusiones que son de nivel relevante, no únicamente para entender el funcionamiento de una red de acceso PON, sino, para poder valorar mediante un modelo de optimización matemático la mejor manera de implementación considerando una pre-planificación de una red de acceso.

Se inició dando un enfoque de gran relevancia a las redes de acceso que se soportan en tecnologías de cable físico con medios de transmisión ópticos, considerando que hoy en día es la tecnología que nos permite abastecernos de diferentes servicios inteligentes soportados en una red de telecomunicaciones, que demandan gran ancho de banda y que en nuestro país en la actualidad tiene un gran desarrollo, pues la implantación de fibra desde las empresas de telecomunicaciones establecidas en nuestro país ha tenido un considerable crecimiento con el fin de brindar servicios por medio de cables que transportan señales ópticas.

Se ha procedido analizar el aporte que puede generarse en una Área de Planeación, el diseño de una red de Fibra Óptica de acceso con tecnología FTTH en estándar GPON. Concretamente enfocada hacia el despliegue de une red de Fibra Óptica, haciendo uso de equipos pasivos y activos como se revisó en el Capítulo 1, donde se explicó de manera detallada de los elementos esenciales y necesarios para el despliegue de distintas topologías de red de acceso PON.

El enfoque de este trabajo de tesis ha tenido presente durante todo su desarrollo la posibilidad de poder implementar una red de Fibra en un cantón de mediana demanda dentro de la provincia del Azuay (Cantón Gualaceo), no de manera determinística, sino más bien estocástica, mediante la rigurosa aplicación de diferentes algoritmos con enfoque de optimización matemáticos que pueden utilizarse para mejorar la asignación de recursos utilizando procesos de optimización, considerando la complejidad computacional que genera y buscar una solución para un problema real como es el caso de aplicación del modelo planteado, es decir un problema que alcanza una complejidad que se ,o ha clasificado como de tipo NP–Hard.

El modelo resulta ideal para aplicaciones reales de implementación en redes de acceso de Telecomunicaciones, aprovechando el conocimiento matemático de los profesionales involucrados en el diseño de una red y los técnicos de campo que participan durante el desarrollo de un plan de proyecto. También ha sido de gran importancia los criterios del personal técnico de campo que participa activamente

durante el despliegue de una red. El resultado que se pretende mediante el modelo de optimización matemático es poder determinar la mejor y óptima ubicación de un equipo activo que es considerado principal en estas redes de acceso, denominado OLT, el mismo que dará servicio mediante los puertos denominados PON a los potenciales usuarios del servicio de telecomunicaciones, esfuerzo que es de gran importancia en una Operadora de Telecomunicaciones que busca Maximizar sus beneficios, pero con una mínima inversión, y tomando en cuenta la máxima utilización de la infraestructura, es decir, que no estén subutilizados o sobre dimensionados.

En el Capítulo 2, se ha definido la Función Objetivo considerando las variables y restricciones que nos llevarán a obtener los resultados. Se ha podido verificar que para la definición de dicha Función es importante considerar variables binarias, que nos llevaran a la mejor toma de decisiones bajo ciertas condiciones planteadas en nuestro caso de estudio.

Los resultados se muestran en el Capítulo 3, resultados que demuestran ambos casos definidos, el esquema determinista y el modelo estocástico, donde se pueden verificar los estados de crecimiento de la demanda, y la comparación de los datos generados traducidos en resultados obtenidos y que se adquieren mediante la aplicación de las dos estrategias implementadas bajo las mismas condiciones de demanda, es importante resaltar que la planeación estocástica superó con un valor en porcentaje del 14.76% a la planeación realizada de forma determinista.

En todas las gráficas presentadas en el Capítulo 3, se ha observado que pueden ayudar a definir estrategias de despliegue de forma que el inversionista, así como el personal técnico, puedan tomar las mejores decisiones dentro de su ámbito de interés.
Se puede comprobar claramente en todos los aspectos técnicos que corresponden al despliegue de redes de acceso PON, que la mala ubicación de un equipo Splitter o Divisor Óptico puede llevar a sobredimensionar o desperdiciar recursos en una red, generando posibles puntos de falla que se pueden derivar por ejemplo de una mala fusión, o una manga o mufa que no se encuentre bien sellada, etc. Estos problemas que pueden generarse causan pérdidas para el operador por los gastos de Operación y Mantenimiento, los cuales deben ser considerados para el buen diseño de una red de fibra óptica de acceso.

En cuanto al costo de puesta a producción de la red, considerando las dos estrategias mencionadas, se puede indicar en base a los resultados obtenidos, que el costo de implementación de una red de Fibra Óptica bajo un esquema de optimización, ha sido menor que la puesta en marcha de una red planificada mediante una metodología determinística.

4.2 Futuras Líneas de Investigación.

Las posibles futuras líneas de investigación que se generan después de la finalización de este documento, iniciarían en una primera etapa por estudiar e investigar aspectos que no han sido tratados en esta tesis, por ejemplo, los siguientes aspectos:

- La implementación de otros algoritmos basado en metaheurísticas que sean factibles de utilizar.

- La realización de un estudio teórico sobre la aplicación en otras áreas relacionadas a las telecomunicaciones.

- La implementación de los algoritmos en otros lenguajes de programación con el fin de realizar una comparación en el desempeño computacional.

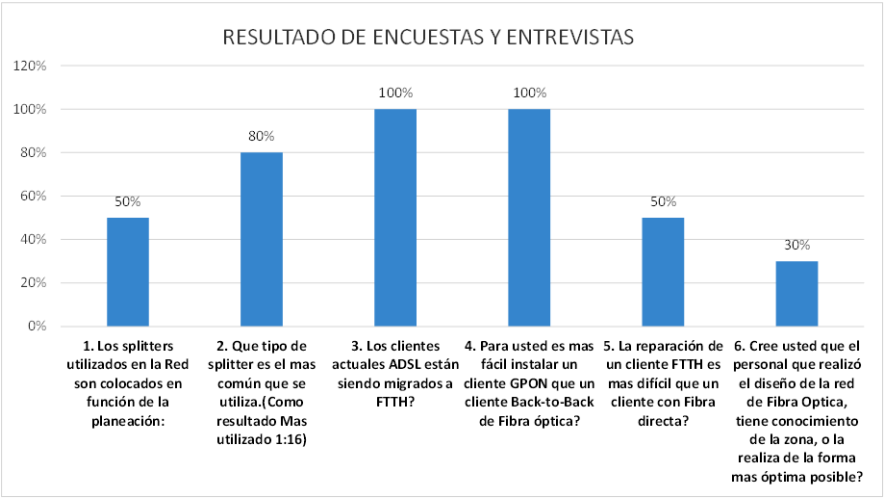
- La aplicación en futuras tecnologías de despliegue de redes de telecomunicaciones fijas o inalámbricas.

- La generación de nuevas Funciones Objetivo con el fin de lograr optimizaciones en el campo técnico-económico en proyectos de despliegue de redes de Telecomunicaciones, tanto a nivel de acceso como en Transmisión.

ANEXOS

ANEXO 1.

FICHA DE ENCUESTA A TÉCNICOS DE LA ZONA DE GUALACEO
Fecha:
Técnico de Red:
Ingeniero de Red:
Años de Trabajo:_____ 1. Los Splitters utilizados en la Red son colocados en función de la planeación: SI_ NO__ 2. Qué tipo de Splitter es el más común que se utiliza. 1:8 1:16 1:32 1:64 3. Los clientes actuales ADSL están siendo migrados a FTTH? SI__ NO__ 4. Para usted es más fácil instalar un cliente GPON que un cliente Back-to-Back de Fibra óptica? SI_ NO__ 5. La reparación de un cliente FTTH es más difícil que un cliente con Fibra directa? SI_ NO__ 6. Cree usted que el personal que realizó el diseño de la red De Fibra Óptica, tiene conocimiento de la zona 7 SI_ NO__


RESULTADO DE ENCUESTAS Y ENTREVISTAS
120%
100%
80%
60%
40%
20%
0%
50%
80%
100%
100%
50%
30%
1. Los splitters utilizados en la Red son colocados en función de la planeación:
2. Que tipo de splitter es el mas común que se utiliza.(Como resultado Mas utilizado 1:16)
3. Los clientes actuales ADSL están siendo migrados a FTTH?
4. Para usted es mas fácil instalar un cliente GPON que un cliente Back-to-Back de Fibra óptica?
5. La reparación de un cliente FTTH es mas difícil que un cliente con Fibra directa?
6. Cree usted que el personal que realizó el diseño de la red de Fibra Optica, tiene conocimiento de la zona, o la realiza de la forma mas óptima posible?

ANEXO 2.

LISTADO DE POTENCIALES CLIENTES – DEMANDA PROYECTADA

	LATITUD			LONGITUD			
ID PUNTO	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	ORIENTACION
1	2	53	13.2919177	78	46	50.6074408	W
2	2	53	13.7445554	78	46	49.0852888	W
3	2	53	14.3627745	78	46	49.0193533	W
4	2	53	14.8867912	78	46	50.7014471	W
5	2	53	15.1768328	78	46	49.2443451	W
6	2	53	15.5009437	78	46	48.5639977	W
7	2	53	15.9563129	78	46	48.4336431	W
8	2	53	16.1556473	78	46	50.5047781	W
9	2	53	17.1606514	78	46	48.5284064	W
10	2	53	17.321022	78	46	47.3304962	W
11	2	53	16.4427012	78	46	47.5264077	W
12	2	53	15.7921284	78	46	47.689509	W
13	2	53	15.8241009	78	46	47.3981392	W
14	2	53	16.049624	78	46	46.2324705	W
15	2	53	16.6993064	78	46	45.6162255	W
16	2	53	16.7306428	78	46	45.0011818	W
17	2	53	15.5260507	78	46	44.77695	W
18	2	53	14.5842306	78	46	45.7821724	W
19	2	53	14.7447281	78	46	44.6489982	W
20	2	53	14.6790033	78	46	44.325451	W
21	2	53	14.6785582	78	46	44.0988794	W
22	2	53	15.4258101	78	46	43.4500775	W
23	2	53	16.0443465	78	46	43.5459779	W
24	2	53	15.7827821	78	46	42.9315038	W
25	2	53	16.0105936	78	46	42.9310611	W
26	2	53	16.4012548	78	46	42.9950367	W
27	2	53	16.9222212	78	46	43.1234941	W
28	2	53	14.9667528	78	46	41.7031255	W
29	2	53	15.2265362	78	46	41.4113133	W

30	2	53	16.3008862	78	46	41.6034297	W
31	2	53	17.0169922	78	46	41.6667725	W
32	2	53	15.2555183	78	46	39.5986785	W
33	2	53	15.4833296	78	46	39.5982356	W
34	2	53	15.7112682	78	46	39.6625273	W
35	2	53	15.9395886	78	46	39.9210231	W
36	2	53	15.8740543	78	46	39.6945782	W
37	2	53	16.1670182	78	46	39.7263761	W
38	2	53	16.5576793	78	46	39.7903514	W
39	2	53	17.0135565	78	46	39.9189348	W
40	2	53	17.339065	78	46	39.9506694	W
41	2	53	17.8942938	78	46	40.9529819	W
42	2	53	17.2125137	78	46	41.7958624	W
43	2	53	17.8313044	78	46	42.0212318	W
44	2	53	18.3502984	78	46	41.1463002	W
45	2	53	18.414942	78	46	40.919602	W
46	2	53	18.5109209	78	46	40.0778604	W
47	2	53	19.5201818	78	46	40.2701025	W
48	2	53	18.2225382	78	46	42.3765137	W
49	2	53	18.4178688	78	46	42.4085015	W
50	2	53	19.3284784	78	46	42.0830558	W
51	2	53	19.7181215	78	46	41.629153	W
52	2	53	20.2709961	78	46	41.4338727	W
53	2	53	20.2703597	78	46	41.1101987	W
54	2	53	20.2697869	78	46	40.8188922	W
55	2	53	20.3343667	78	46	40.5598265	W
56	2	53	20.3989465	78	46	40.3007608	W
57	2	53	20.7247732	78	46	40.4943321	W
58	2	53	20.6626118	78	46	41.9833589	W
59	2	53	20.6316582	78	46	42.7926073	W
60	2	53	20.2408697	78	46	42.6638971	W
61	2	53	20.2099794	78	46	43.5055128	W
62	2	53	19.819509	78	46	43.5386395	W
63	2	53	19.3649038	78	46	44.0574037	W

64	2	53	19.1044841	78	46	44.0255425	W
65	2	53	18.3231615	78	46	43.8975912	W
66	2	53	18.1278308	78	46	43.8656034	W
67	2	53	18.0319146	78	46	44.7397128	W
68	2	53	18.4886189	78	46	45.289073	W
69	2	53	18.6514051	78	46	45.3211242	W
70	2	53	19.3675752	78	46	45.4168348	W
71	2	53	19.7582366	78	46	45.4808106	W
72	2	53	20.0838726	78	46	45.5772802	W
73	2	53	20.1478803	78	46	45.0269076	W
74	2	53	20.1797251	78	46	44.6708028	W
75	2	53	20.2114426	78	46	44.2499632	W
76	2	53	20.8620783	78	46	44.1192281	W
77	2	53	20.9915565	78	46	43.7629335	W
78	2	53	21.5123322	78	46	43.7942884	W
79	2	53	21.870449	78	46	43.8583271	W
80	2	53	21.7337796	78	46	40.5571044	W
81	2	53	22.0926601	78	46	41.0095517	W
82	2	53	22.061134	78	46	41.5274935	W
83	2	53	22.0305625	78	46	42.5309466	W
84	2	53	21.9672554	78	46	43.4373608	W
85	2	53	21.386035	78	46	45.7689543	W
86	2	53	20.63573	78	46	44.8641216	W
87	2	53	20.5386053	78	46	45.1232507	W
88	2	53	20.5069513	78	46	45.5764579	W
89	2	53	20.5408316	78	46	46.2561105	W
90	2	53	21.2570018	78	46	46.3518211	W
91	2	53	21.4848771	78	46	46.3837457	W
92	2	53	22.071251	78	46	46.6739139	W
93	2	53	20.7706148	78	46	47.259058	W
94	2	53	20.4461234	78	46	47.745202	W
95	2	53	21.9098004	78	46	47.3215791	W
96	2	53	22.0403602	78	46	47.5155307	W
97	2	53	22.0085152	78	46	47.8716359	W

98	2	53	22.0095328	78	46	48.389515	W
99	2	53	21.8797362	78	46	48.5839727	W
100	2	53	21.8479547	78	46	48.9724454	W
101	2	53	21.9462878	78	46	49.3282976	W
102	2	53	19.9590364	78	46	48.296397	W
103	2	53	21.2308166	78	46	49.5886285	W
104	2	53	20.9714139	78	46	50.0746461	W
105	2	53	19.8634373	78	46	49.3323446	W
106	2	53	19.5379283	78	46	49.3006094	W
107	2	53	18.8867832	78	46	49.1724042	W
108	2	53	18.6263633	78	46	49.1405426	W
109	2	53	18.398488	78	46	49.1086177	W
110	2	53	17.6183089	78	46	49.5632788	W
111	2	53	17.9114005	78	46	49.6598122	W
112	2	53	18.2369094	78	46	49.6915474	W
113	2	53	19.2787162	78	46	49.8837291	W
114	2	53	19.3763498	78	46	49.8835394	W
115	2	53	19.7672022	78	46	50.044618	W
116	2	53	20.2903304	78	46	51.2735695	W
117	2	53	21.7552166	78	46	51.4649295	W
118	2	53	21.8854584	78	46	51.497044	W
119	2	53	21.8198607	78	46	51.2382307	W
120	2	53	22.3098725	78	46	52.1759391	W
121	2	53	22.3079019	78	46	51.1725474	W
122	2	53	22.3400014	78	46	50.9459119	W
123	2	53	22.339302	78	46	50.5898698	W
124	2	53	22.5014526	78	46	50.2982464	W
125	2	53	22.370257	78	46	49.7806199	W
126	2	53	22.630677	78	46	49.8124815	W
127	2	53	22.3686037	78	46	48.939066	W
128	2	53	22.3677134	78	46	48.4859217	W
129	2	53	22.4966832	78	46	47.8706871	W
130	2	53	22.4310853	78	46	47.611874	W
131	2	53	22.6262253	78	46	47.5467595	W

132	2	53	22.4952839	78	46	47.1586032	W
133	2	53	22.461658	78	46	46.6084199	W
134	2	53	22.8847368	78	46	46.6075974	W
135	2	53	23.1124849	78	46	46.5747871	W
136	2	53	23.2427902	78	46	46.6392689	W
137	2	53	23.1803727	78	46	47.9988285	W
138	2	53	22.9897479	78	46	50.3620328	W
139	2	53	23.1200533	78	46	50.4265148	W
140	2	53	23.3153841	78	46	50.4585028	W
141	2	53	23.7435495	78	46	53.0470794	W
142	2	53	24.2334978	78	46	53.952421	W
143	2	53	23.7461555	78	46	54.3741468	W
144	2	53	23.1927072	78	46	54.2781188	W
145	2	53	22.6720576	78	46	54.3114976	W
146	2	53	13.1966263	78	46	35.2330772	W
147	2	53	13.2284069	78	46	34.8446063	W
148	2	53	13.6191313	78	46	34.9409486	W
149	2	53	13.0920541	78	46	31.7052327	W
150	2	53	12.5677137	78	46	29.8613116	W
151	2	53	13.38298	78	46	30.7012771	W
152	2	53	14.3553636	78	46	28.6926059	W
153	2	53	13.6706569	78	46	28.0465912	W
154	2	53	14.1588231	78	46	28.0456408	W
155	2	53	13.472651	78	46	26.6551794	W
156	2	53	13.6018091	78	46	26.1370499	W
157	2	53	13.9262335	78	46	25.6185402	W
158	2	53	13.7982224	78	46	26.7192802	W
159	2	53	14.7406081	78	46	26.0053627	W
160	2	53	15.0012819	78	46	26.166692	W
161	2	53	15.0361204	78	46	27.33185	W
162	2	53	15.4269081	78	46	27.4605586	W
163	2	53	15.5344787	78	46	32.5096652	W
164	2	53	14.268238	78	46	34.033398	W
165	2	53	14.9193179	78	46	34.1292336	W

166	2	53	15.0203887	78	46	35.8768785	W
167	2	53	15.4768386	78	46	36.2967674	W
168	2	53	15.5401452	78	46	35.3903558	W
169	2	53	15.8005645	78	46	35.4222166	W
170	2	53	15.9918838	78	46	33.4150631	W
171	2	53	16.1497021	78	46	30.922464	W
172	2	53	16.3392348	78	46	28.0090278	W
173	2	53	17.5413384	78	46	26.9709297	W
174	2	53	17.2196543	78	46	28.8812335	W
175	2	53	16.9926718	78	46	29.3024519	W
176	2	53	17.253282	78	46	29.4314141	W
177	2	53	17.2888208	78	46	30.9526139	W
178	2	53	17.5817206	78	46	30.9520437	W
179	2	53	17.8421397	78	46	30.9839041	W
180	2	53	16.2865667	78	46	34.3207779	W
181	2	53	16.5468586	78	46	34.287904	W
182	2	53	16.9049112	78	46	34.3195747	W
183	2	53	17.8508015	78	46	35.3858602	W
184	2	53	18.0461319	78	46	35.4178476	W
185	2	53	17.0715172	78	46	36.2936653	W
186	2	53	16.9099407	78	46	36.8765939	W
187	2	53	17.2680571	78	46	36.9406322	W
188	2	53	17.6260462	78	46	36.9399358	W
189	2	53	18.1147861	78	46	37.2302922	W
190	2	53	17.8549396	78	46	37.4897375	W
191	2	53	17.7255256	78	46	37.878399	W
192	2	53	15.1890296	78	46	38.8867236	W
193	2	53	15.5465097	78	46	38.6270887	W
194	2	53	15.8076928	78	46	39.0473579	W
195	2	53	16.1330103	78	46	38.9819903	W
196	2	53	16.3934297	78	46	39.0138514	W
197	2	53	18.6072815	78	46	39.4303231	W
198	2	53	18.5407287	78	46	38.6860003	W
199	2	53	18.6051811	78	46	38.3622001	W

200	2	53	18.6046082	78	46	38.0708938	W
201	2	53	18.8632452	78	46	37.1964686	W
202	2	53	18.731794	78	46	36.5493748	W
203	2	53	18.7637018	78	46	36.225638	W
204	2	53	18.8280266	78	46	35.8371032	W
205	2	53	18.9248322	78	46	35.4161377	W
206	2	53	19.152707	78	46	35.4480617	W
207	2	53	18.987119	78	46	33.9918479	W
208	2	53	19.1165961	78	46	33.6355539	W
209	2	53	19.1147489	78	46	32.6969012	W
210	2	53	19.2768978	78	46	32.4052784	W
211	2	53	19.1462104	78	46	32.1465932	W
212	2	53	19.3402028	78	46	31.4988665	W
213	2	53	19.3067027	78	46	31.01342	W
214	2	53	19.3687328	78	46	29.459662	W
215	2	53	21.0599589	78	46	28.9061214	W
216	2	53	21.5809883	78	46	29.0669437	W
217	2	53	21.581562	78	46	29.3582496	W
218	2	53	21.4524679	78	46	29.9087478	W
219	2	53	21.5185765	78	46	30.4264984	W
220	2	53	20.838967	78	46	32.3698697	W
221	2	53	20.7440094	78	46	33.7294883	W
222	2	53	20.7771272	78	46	34.0207311	W
223	2	53	20.7125479	78	46	34.2797966	W
224	2	53	20.2250818	78	46	34.6367877	W
225	2	53	19.7367877	78	46	34.5730032	W
226	2	53	19.4764321	78	46	34.57351	W
227	2	53	20.1292317	78	46	35.5432637	W
228	2	53	20.5531375	78	46	35.963216	W
229	2	53	20.0663716	78	46	36.6762479	W
230	2	53	20.0676451	78	46	37.3235952	W
231	2	53	19.2259449	78	46	39.5909573	W
232	2	53	19.4538199	78	46	39.6228815	W
233	2	53	19.7467202	78	46	39.6223118	W

234	2	53	20.2025339	78	46	39.7185277	W
235	2	53	20.4291358	78	46	39.1031043	W
236	2	53	20.4286265	78	46	38.8441652	W
237	2	53	20.3946178	78	46	38.0997789	W
238	2	53	20.8854587	78	46	39.4582591	W
239	2	53	20.8194149	78	46	38.972875	W
240	2	53	20.9477464	78	46	38.0339677	W
241	2	53	21.074231	78	46	36.1564067	W
242	2	53	21.2033261	78	46	35.6059081	W
243	2	53	21.3986565	78	46	35.6378954	W
244	2	53	21.2005872	78	46	34.2141116	W
245	2	53	21.2645294	78	46	33.6313725	W
246	2	53	21.295927	78	46	33.0486968	W
247	2	53	21.8130059	78	46	31.2027441	W
248	2	53	22.0408169	78	46	31.2023004	W
249	2	53	22.5616552	78	46	31.2660209	W
250	2	53	22.6252144	78	46	30.4890778	W
251	2	53	22.6889646	78	46	29.8092368	W
252	2	53	23.1445227	78	46	29.7759818	W
253	2	53	23.306161	78	46	29.22542	W
254	2	53	24.4455981	78	46	29.4174047	W
255	2	53	23.2450245	78	46	31.2323224	W
256	2	53	23.0523072	78	46	32.527397	W
257	2	53	23.0207823	78	46	33.0453382	W
258	2	53	22.5328706	78	46	33.1757582	W
259	2	53	22.4363842	78	46	33.7585609	W
260	2	53	22.4372761	78	46	34.211704	W
261	2	53	22.9570953	78	46	33.757547	W
262	2	53	22.9255703	78	46	34.2754882	W
263	2	53	22.9589429	78	46	34.6962007	W
264	2	53	23.3498586	78	46	34.8896446	W
265	2	53	21.8237725	78	46	36.6728279	W
266	2	53	21.7928201	78	46	37.4820757	W
267	2	53	22.2484427	78	46	37.481189	W

268	2	53	22.0880127	78	46	38.6467316	W
269	2	53	22.2187	78	46	38.9054175	W
270	2	53	22.1224036	78	46	39.5853227	W
271	2	53	22.7417037	78	46	40.0696307	W
272	2	53	23.2952146	78	46	40.1980239	W
273	2	53	23.5178043	78	46	37.5434536	W
274	2	53	23.6143549	78	46	36.9930178	W
275	2	53	24.2602749	78	46	34.4670944	W
276	2	53	24.322305	78	46	32.9133335	W
277	2	53	24.3216039	78	46	32.5572924	W
278	2	53	24.3536385	78	46	32.2982901	W
279	2	53	24.3530648	78	46	32.0069837	W
280	2	53	25.3891949	78	46	29.3184636	W
281	2	53	24.9376534	78	46	31.3908626	W
282	2	53	24.9391833	78	46	32.1676795	W
283	2	53	24.8781096	78	46	34.2069512	W
284	2	53	24.8786194	78	46	34.4658903	W
285	2	53	24.1973523	78	46	35.5677122	W
286	2	53	24.2954953	78	46	35.8264613	W
287	2	53	24.8486236	78	46	35.7606493	W
288	2	53	25.0438903	78	46	35.7602691	W
289	2	53	24.2001552	78	46	36.9918775	W
290	2	53	24.2021297	78	46	37.9952669	W
291	2	53	24.1048785	78	46	38.1896614	W
292	2	53	24.1705406	78	46	38.4808413	W
293	2	53	24.1709864	78	46	38.7074132	W
294	2	53	24.1072347	78	46	39.3872555	W
295	2	53	23.6207867	78	46	40.2621255	W
296	2	53	24.0778739	78	46	41.0056896	W
297	2	53	24.7277449	78	46	40.4865444	W
298	2	53	24.6938632	78	46	39.8068919	W
299	2	53	24.6907426	78	46	38.2208886	W
300	2	53	24.7587611	78	46	39.709663	W
301	2	53	24.7546851	78	46	37.6381486	W

302	2	53	24.8848629	78	46	37.6378952	W
303	2	53	25.1452824	78	46	37.6697558	W
304	2	53	25.3720107	78	46	37.1190664	W
305	2	53	25.7601232	78	46	35.8883446	W
306	2	53	25.7583391	78	46	34.9820574	W
307	2	53	26.9534951	78	46	30.4159099	W
308	2	53	27.3755522	78	46	29.8972074	W
309	2	53	26.8274617	78	46	32.5200436	W
310	2	53	26.7971483	78	46	33.6529658	W
311	2	53	26.7658787	78	46	34.3003771	W
312	2	53	26.7673445	78	46	35.0448274	W
313	2	53	26.1526319	78	46	36.8909738	W
314	2	53	25.6335131	78	46	37.7011729	W
315	2	53	26.0566549	78	46	37.7327167	W
316	2	53	26.0274226	78	46	39.415886	W
317	2	53	25.0533171	78	46	40.550646	W
318	2	53	25.2813195	78	46	40.6473049	W
319	2	53	25.4439783	78	46	40.6146209	W
320	2	53	25.5742199	78	46	40.646735	W
321	2	53	25.7369423	78	46	40.6464183	W
322	2	53	26.0290785	78	46	40.2574391	W
323	2	53	26.3931168	78	46	43.3316496	W
324	2	53	26.9465006	78	46	43.3953081	W
325	2	53	27.0431155	78	46	42.8772388	W
326	2	53	26.8477848	78	46	42.8452513	W
327	2	53	26.4229236	78	46	41.9397859	W
328	2	53	26.454704	78	46	41.5513133	W
329	2	53	26.5843725	78	46	41.2921204	W
330	2	53	26.8448558	78	46	41.3563486	W
331	2	53	26.518201	78	46	40.7420006	W
332	2	53	26.5813157	78	46	39.7384834	W
333	2	53	26.5142522	78	46	38.7352198	W
334	2	53	26.6100382	78	46	37.7963744	W
335	2	53	26.7074805	78	46	37.6990821	W

336	2	53	26.6088278	78	46	37.1813935	W
337	2	53	26.6404802	78	46	36.7281863	W
338	2	53	26.9643318	78	46	35.9183672	W
339	2	53	27.1922068	78	46	35.950291	W
340	2	53	27.4525624	78	46	35.9497839	W
341	2	53	27.8432233	78	46	36.0137582	W
342	2	53	27.2924526	78	46	37.277165	W
343	2	53	27.0329889	78	46	37.7308159	W
344	2	53	27.2609913	78	46	37.8274746	W
345	2	53	26.8437732	78	46	40.8061021	W
346	2	53	24.1980926	78	46	52.4959469	W
347	2	53	24.2301285	78	46	52.2369437	W
348	2	53	24.2296835	78	46	52.0103713	W
349	2	53	24.2291113	78	46	51.7190639	W
350	2	53	24.26102	78	46	51.3953258	W
351	2	53	24.2277124	78	46	51.0069792	W
352	2	53	24.2910846	78	46	50.1329307	W
353	2	53	24.4208812	78	46	49.9384729	W
354	2	53	23.5394439	78	46	48.5483795	W
355	2	53	23.7021665	78	46	48.5480632	W
356	2	53	23.733757	78	46	48.062488	W
357	2	53	23.9267977	78	46	46.9292473	W
358	2	53	24.3486677	78	46	46.3134431	W
359	2	53	24.3796852	78	46	45.5365609	W
360	2	53	24.3791761	78	46	45.2776213	W
361	2	53	24.8995065	78	46	45.082404	W
362	2	53	25.3553842	78	46	45.2109877	W
363	2	53	24.8043546	78	46	46.3449246	W
364	2	53	24.805309	78	46	46.8304365	W
365	2	53	24.3510217	78	46	47.5110391	W
366	2	53	24.3533753	78	46	48.7086353	W
367	2	53	25.1375607	78	46	50.2931236	W
368	2	53	25.0696731	78	46	48.869081	W
369	2	53	25.1663525	78	46	48.383379	W

370	2	53	25.1634897	78	46	46.9268429	W
371	2	53	25.2601688	78	46	46.4411411	W
372	2	53	25.3914286	78	46	46.9911348	W
373	2	53	25.4879805	78	46	46.4406981	W
374	2	53	26.3296192	78	46	44.1409626	W
375	2	53	27.0468715	78	46	44.7869191	W
376	2	53	27.0481445	78	46	45.4342685	W
377	2	53	26.8526865	78	46	45.3375459	W
378	2	53	26.6572921	78	46	45.2731907	W
379	2	53	26.4619614	78	46	45.2412031	W
380	2	53	26.2680944	78	46	45.9536671	W
381	2	53	26.2361863	78	46	46.2774051	W
382	2	53	25.8462884	78	46	46.6018393	W
383	2	53	25.8472428	78	46	47.0873513	W
384	2	53	26.4321534	78	46	46.6330676	W
385	2	53	26.4330443	78	46	47.0862122	W
386	2	53	26.2388588	78	46	47.636839	W
387	2	53	26.2073959	78	46	48.1871495	W
388	2	53	26.3071288	78	46	49.2550867	W
389	2	53	26.3402459	78	46	49.5463308	W
390	2	53	26.2104494	78	46	49.7407888	W
391	2	53	25.8199149	78	46	49.741548	W
392	2	53	25.7560343	78	46	50.3566568	W
393	2	53	25.3661357	78	46	50.6810907	W
394	2	53	25.7570519	78	46	50.8745367	W
395	2	53	25.6282091	78	46	51.5545071	W
396	2	53	25.6638694	78	46	53.1404515	W
397	2	53	26.089301	78	46	54.3372275	W
398	2	53	26.7652968	78	46	50.5489008	W
399	2	53	27.0555896	78	46	49.221264	W
400	2	53	27.4126888	78	46	48.767423	W
401	2	53	27.1492783	78	46	47.2142898	W
402	2	53	26.8228786	78	46	46.7294105	W
403	2	53	27.0181457	78	46	46.7290308	W

404	2	53	27.4738963	78	46	46.7928796	W
405	2	53	27.8950021	78	46	45.7886648	W
406	2	53	27.6368098	78	46	46.8896656	W
407	2	53	27.8317588	78	46	46.7274484	W
408	2	53	28.3500524	78	46	45.4964712	W
409	2	53	28.3185263	78	46	46.0144142	W
410	2	53	27.8978024	78	46	47.2128341	W
411	2	53	27.7683243	78	46	47.5691297	W
412	2	53	27.671518	78	46	47.9900969	W
413	2	53	27.8016325	78	46	47.9574763	W
414	2	53	27.8022688	78	46	48.2811512	W
415	2	53	27.058325	78	46	50.6130664	W
416	2	53	27.2210477	78	46	50.6127501	W
417	2	53	27.4488595	78	46	50.6123073	W
418	2	53	27.6779435	78	46	51.2592146	W
419	2	53	27.5487194	78	46	51.7449804	W
420	2	53	27.6469254	78	46	52.0360983	W
421	2	53	27.5171288	78	46	52.2305564	W
422	2	53	27.6476886	78	46	52.4245085	W
423	2	53	28.0426746	78	46	54.6894765	W
424	2	53	28.1356026	78	46	52.2940896	W
425	2	53	28.1671295	78	46	51.776146	W
426	2	53	28.1663026	78	46	51.3553683	W
427	2	53	28.099496	78	46	50.4815719	W
428	2	53	28.130132	78	46	49.5104834	W
429	2	53	28.581683	78	46	47.4380774	W
430	2	53	28.4115763	78	46	43.6837658	W
431	2	53	27.6329273	78	46	44.9152494	W
432	2	53	27.4375329	78	46	44.8508943	W
433	2	53	27.9218169	78	46	42.8755291	W
434	2	53	28.5729616	78	46	43.0037323	W
435	2	53	28.7046042	78	46	43.7479309	W
436	2	53	28.9649602	78	46	43.7474243	W
437	2	53	29.159081	78	46	43.1644297	W

438	2	53	29.2255072	78	46	43.8440201	W
439	2	53	29.354348	78	46	43.1640497	W
440	2	53	29.4532551	78	46	43.8112093	W
441	2	53	29.5496787	78	46	43.1960372	W
442	2	53	29.7775539	78	46	43.2279613	W
443	2	53	29.9090055	78	46	43.8750576	W
444	2	53	29.228054	78	46	45.1387194	W
445	2	53	29.1991379	78	46	46.9837298	W
446	2	53	29.4270769	78	46	47.0480216	W
447	2	53	29.5276381	78	46	48.536737	W
448	2	53	29.3659336	78	46	49.0549336	W
449	2	53	29.3996235	78	46	49.6374856	W
450	2	53	28.5530837	78	46	49.4449258	W
451	2	53	28.848784	78	46	50.8685269	W
452	2	53	29.1413668	78	46	50.7061199	W
453	2	53	29.1093312	78	46	50.9651233	W
454	2	53	28.6612122	78	46	54.7853776	W
455	2	53	28.9216959	78	46	54.8496068	W
456	2	53	30.0568128	78	46	52.8406054	W
457	2	53	30.5756173	78	46	51.8685669	W
458	2	53	29.4675121	78	46	51.0615299	W
459	2	53	30.1506931	78	46	50.930731	W
460	2	53	29.7259598	78	46	50.089998	W
461	2	53	30.343797	78	46	49.8298554	W
462	2	53	30.1472571	78	46	49.1828847	W
463	2	53	29.6264172	78	46	49.1191623	W
464	2	53	29.7884399	78	46	48.7628032	W
465	2	53	29.6902335	78	46	48.4716855	W
466	2	53	29.7539224	78	46	47.7594737	W
467	2	53	29.7853213	78	46	47.1767953	W
468	2	53	29.8163381	78	46	46.3999119	W
469	2	53	29.8477367	78	46	45.8172337	W
470	2	53	30.3010042	78	46	44.6187499	W
471	2	53	30.3973004	78	46	43.9388426	W

472	2	53	30.625112	78	46	43.9383992	W
473	2	53	30.6930028	78	46	45.3624424	W
474	2	53	30.4988817	78	46	45.9454373	W
475	2	53	30.5667081	78	46	47.3371135	W
476	2	53	30.1769376	78	46	47.7262833	W
477	2	53	30.3399149	78	46	47.8554368	W
478	2	53	30.5677266	78	46	47.8549937	W
479	2	53	30.8932992	78	46	47.9190956	W
480	2	53	31.0223315	78	46	47.3362271	W
481	2	53	30.9871131	78	46	45.976855	W
482	2	53	31.6055863	78	46	46.0403869	W
483	2	53	31.86486	78	46	45.4896326	W
484	2	53	31.5355938	78	46	43.5482158	W
485	2	53	31.8284307	78	46	43.5152782	W
486	2	53	32.2529741	78	46	44.2589073	W
487	2	53	32.2533563	78	46	44.4531123	W
488	2	53	32.3533461	78	46	45.6505202	W
489	2	53	32.2247599	78	46	46.4599614	W
490	2	53	31.8029545	78	46	47.108135	W
491	2	53	31.445665	78	46	47.4648741	W
492	2	53	31.8688711	78	46	47.5287861	W
493	2	53	31.7071034	78	46	48.0146155	W
494	2	53	31.6106792	78	46	48.6297884	W
495	2	53	31.6774231	78	46	49.4712176	W
496	2	53	30.8646369	78	46	49.8935778	W
497	2	53	30.9000449	78	46	51.3500536	W
498	2	53	31.4555291	78	46	52.4818419	W
499	2	53	31.4238115	78	46	52.9026833	W
500	2	53	31.2943966	78	46	53.291347	W
501	2	53	31.5230355	78	46	53.7116824	W
502	2	53	31.4909998	78	46	53.9706861	W
503	2	53	31.5243077	78	46	54.3590336	W
504	2	53	31.232297	78	46	54.8127487	W
505	2	53	31.3955922	78	46	55.1037405	W

506	2	53	31.1354264	78	46	55.2013492	W
507	2	53	31.8185445	78	46	55.0381831	W
508	2	53	31.9482139	78	46	54.7789896	W
509	2	53	31.9151605	78	46	54.5201123	W
510	2	53	32.9862049	78	46	53.0291164	W
511	2	53	32.7245759	78	46	52.3822714	W
512	2	53	32.984996	78	46	52.4141327	W
513	2	53	32.0700578	78	46	50.5385868	W
514	2	53	32.2299165	78	46	49.081731	W
515	2	53	32.2285161	78	46	48.3696453	W
516	2	53	32.1617082	78	46	47.4958487	W
517	2	53	32.3897109	78	46	47.5925081	W
518	2	53	32.516005	78	46	45.617836	W
519	2	53	32.6461831	78	46	45.6175826	W
520	2	53	32.9365999	78	46	44.3546795	W
521	2	53	33.5539263	78	46	43.8355957	W
522	2	53	33.3299363	78	46	45.7780902	W
523	2	53	33.980954	78	46	45.8415584	W
524	2	53	34.1762848	78	46	45.8735459	W
525	2	53	34.2713705	78	46	44.5786548	W
526	2	53	34.36773	78	46	43.9311143	W
527	2	53	34.856025	78	46	43.994899	W
528	2	53	34.6665542	78	46	46.9407245	W
529	2	53	34.6020383	78	46	47.232159	W
530	2	53	34.961429	78	46	47.9435484	W
531	2	53	34.4417353	78	46	48.4624424	W
532	2	53	33.4965432	78	46	47.7521928	W
533	2	53	32.6501945	78	46	47.6567366	W
534	2	53	32.7488467	78	46	48.1744271	W
535	2	53	33.7609738	78	46	49.8232091	W
536	2	53	34.2818774	78	46	49.9192988	W
537	2	53	34.6400584	78	46	50.0157051	W
538	2	53	33.6321323	78	46	50.503181	W
539	2	53	33.4366741	78	46	50.4064581	W

540	2	53	33.799119	78	46	52.6714911	W
541	2	53	34.2860782	78	46	52.055558	W
542	2	53	34.3495126	78	46	51.2138746	W
543	2	53	34.807173	78	46	52.2487507	W
544	2	53	35.6219961	78	46	52.8621523	W
545	2	53	37.0873923	78	46	53.3124502	W
546	2	53	36.2039153	78	46	50.8865904	W
547	2	53	36.3002757	78	46	50.2390489	W
548	2	53	36.6910012	78	46	50.3353918	W
549	2	53	36.655464	78	46	48.8141792	W
550	2	53	36.883212	78	46	48.7813683	W
551	2	53	36.7519513	78	46	48.231373	W
552	2	53	37.4029693	78	46	48.2948413	W
553	2	53	37.595816	78	46	47.0644937	W
554	2	53	36.5502507	78	46	44.9626301	W
555	2	53	38.1151269	78	46	46.3513935	W
556	2	53	37.4927671	78	46	44.3134415	W
557	2	53	39.2182632	78	46	44.633758	W
558	2	53	38.8951759	78	46	45.8319917	W
559	2	53	39.5129481	78	46	45.5394794	W
560	2	53	40.0335966	78	46	45.5060978	W
561	2	53	39.8080153	78	46	46.6394066	W
562	2	53	40.2637023	78	46	46.670887	W
563	2	53	40.8823031	78	46	46.7991532	W
564	2	53	40.2000787	78	46	47.4154682	W
565	2	53	40.6234761	78	46	47.5764824	W
566	2	53	41.0148387	78	46	47.9965007	W
567	2	53	39.356724	78	46	48.8412894	W
568	2	53	38.3796236	78	46	48.4547788	W
569	2	53	33.3169942	78	46	55.74736	W
570	2	53	27.4622458	78	46	40.8696335	W
571	2	53	27.7226654	78	46	40.9014943	W
572	2	53	27.9535337	78	46	42.4546887	W
573	2	53	28.0462632	78	46	39.9622048	W

574	2	53	27.9805372	78	46	39.6386571	W
575	2	53	28.1080394	78	46	38.2789712	W
576	2	53	27.6841968	78	46	37.8913857	W
577	2	53	27.4877831	78	46	37.3091522	W
578	2	53	27.7155307	78	46	37.2763412	W
579	2	53	28.1379078	78	46	36.9194757	W
580	2	53	28.1036427	78	46	36.0456186	W
581	2	53	28.1344664	78	46	35.1716348	W
582	2	53	28.0686126	78	46	34.7833526	W
583	2	53	28.1656086	78	46	34.4594883	W
584	2	53	28.0344746	78	46	33.9742307	W
585	2	53	27.9035956	78	46	33.6184429	W
586	2	53	28.229295	78	46	33.7472785	W
587	2	53	28.2604369	78	46	33.0351321	W
588	2	53	28.2245132	78	46	31.3197234	W
589	2	53	28.6856185	78	46	34.1024324	W
590	2	53	28.6893792	78	46	36.0121102	W
591	2	53	28.5929567	78	46	36.6272815	W
592	2	53	28.6262659	78	46	37.0156273	W
593	2	53	28.563662	78	46	38.278084	W
594	2	53	28.6618689	78	46	38.5692009	W
595	2	53	28.5015037	78	46	39.7671132	W
596	2	53	28.5348763	78	46	40.1878267	W
597	2	53	28.4403001	78	46	41.7416546	W
598	2	53	28.4415737	78	46	42.3890038	W
599	2	53	28.6356307	78	46	41.773642	W
600	2	53	28.8634421	78	46	41.7731986	W
601	2	53	29.116472	78	46	38.0504347	W
602	2	53	29.0801676	78	46	36.1408193	W
603	2	53	29.6333597	78	46	36.1073742	W
604	2	53	30.4051174	78	46	31.3802085	W
605	2	53	31.0553681	78	46	31.0552656	W
606	2	53	30.9930218	78	46	32.4471915	W
607	2	53	30.9290809	78	46	33.029932	W

608	2	53	30.8980031	78	46	33.7744463	W
609	2	53	30.8665426	78	46	34.324756	W
610	2	53	30.8346995	78	46	34.6808612	W
611	2	53	30.8359746	78	46	35.32821	W
612	2	53	30.1868066	78	46	36.2033988	W
613	2	53	30.1547721	78	46	36.4624018	W
614	2	53	30.1233749	78	46	37.0450791	W
615	2	53	29.9940893	78	46	37.4984769	W
616	2	53	30.0937619	78	46	38.5340451	W
617	2	53	30.0293739	78	46	38.8902139	W
618	2	53	29.9651133	78	46	39.3111175	W
619	2	53	30.0307119	78	46	39.5699305	W
620	2	53	29.9668972	78	46	40.2174064	W
621	2	53	29.9378562	78	46	41.9976805	W
622	2	53	29.9386842	78	46	42.4184577	W
623	2	53	30.9469266	78	46	42.0928191	W
624	2	53	30.5836495	78	46	39.4070159	W
625	2	53	30.6151744	78	46	38.8890732	W
626	2	53	30.6146009	78	46	38.597766	W
627	2	53	30.8414563	78	46	38.1118105	W
628	2	53	30.8729811	78	46	37.5938678	W
629	2	53	31.1334005	78	46	37.6257282	W
630	2	53	31.3612755	78	46	37.6576519	W
631	2	53	31.4886487	78	46	36.2332304	W
632	2	53	31.8795009	78	46	36.3943068	W
633	2	53	32.3317441	78	46	34.6779441	W
634	2	53	33.0444055	78	46	32.9934416	W
635	2	53	33.1070704	78	46	31.763352	W
636	2	53	33.8556561	78	46	31.7942601	W
637	2	53	34.2463806	78	46	31.890601	W
638	2	53	34.022716	78	46	33.9949294	W
639	2	53	33.4075602	78	46	35.6145075	W
640	2	53	34.2879184	78	46	36.4543494	W
641	2	53	33.9299293	78	46	36.4550469	W

642	2	53	33.7020543	78	46	36.4231234	W
643	2	53	33.4416987	78	46	36.4236307	W
644	2	53	33.2136962	78	46	36.3269722	W
645	2	53	32.7921483	78	46	37.1046156	W
646	2	53	32.238765	78	46	37.0409585	W
647	2	53	32.8259677	78	46	37.7519016	W
648	2	53	33.1514761	78	46	37.7836351	W
649	2	53	33.6409818	78	46	38.4624011	W
650	2	53	33.2179674	78	46	38.4955927	W
651	2	53	33.5772952	78	46	39.1746125	W
652	2	53	33.3169394	78	46	39.1751196	W
653	2	53	32.6659861	78	46	39.1440199	W
654	2	53	32.6342064	78	46	39.532493	W
655	2	53	32.0798669	78	46	38.9833235	W
656	2	53	31.6227785	78	46	38.2397591	W
657	2	53	30.8440053	78	46	39.4065089	W
658	2	53	31.137033	78	46	39.4706735	W
659	2	53	31.3973888	78	46	39.4701665	W
660	2	53	31.6578721	78	46	39.5343944	W
661	2	53	31.8911629	78	46	42.3175542	W
662	2	53	31.8593828	78	46	42.7060275	W
663	2	53	32.4444193	78	46	42.3164771	W
664	2	53	32.5723036	78	46	41.150994	W
665	2	53	32.571093	78	46	40.5360117	W
666	2	53	34.6582095	78	46	42.7005784	W
667	2	53	34.4288051	78	46	41.8918342	W
668	2	53	34.6175709	78	46	38.589969	W
669	2	53	35.1371987	78	46	38.0387072	W
670	2	53	34.6117687	78	46	35.6445283	W
671	2	53	36.045638	78	46	36.612762	W
672	2	53	36.6639189	78	46	36.5791893	W
673	2	53	35.5290712	78	46	38.7176637	W
674	2	53	35.8614	78	46	42.2127207	W
675	2	53	36.21684	78	46	40.9173227	W

676	2	53	36.8999555	78	46	40.7541538	W
677	2	53	36.8298936	78	46	38.2296146	W
678	2	53	37.1544455	78	46	37.7758354	W
679	2	53	37.482951	78	46	39.3288417	W
680	2	53	37.6124275	78	46	38.9725453	W
681	2	53	37.6110246	78	46	38.26046	W
682	2	53	38.519272	78	46	36.737411	W
683	2	53	39.1035412	78	46	35.9594488	W
684	2	53	39.6243801	78	46	36.0231685	W
685	2	53	40.2746311	78	46	35.6982243	W
686	2	53	40.0818526	78	46	36.9609382	W
687	2	53	38.7517391	78	46	39.0997957	W
688	2	53	38.1658748	78	46	39.0685697	W
689	2	53	38.2716047	78	46	43.1790562	W
690	2	53	38.6309963	78	46	43.8904451	W
691	2	53	39.7332384	78	46	41.7196637	W
692	2	53	39.3081198	78	46	40.6847266	W
693	2	53	40.2170058	78	46	39.4853519	W
694	2	53	41.1202764	78	46	35.4376341	W
695	2	53	41.672128	78	46	34.7244696	W
696	2	53	42.0955249	78	46	34.885482	W
697	2	53	41.675255	78	46	36.3104784	W
698	2	53	41.611506	78	46	36.9903235	W
699	2	53	41.4198757	78	46	38.8356539	W
700	2	53	40.9367469	78	46	41.3936418	W
701	2	53	40.9412736	78	46	43.6917388	W
702	2	53	47.1064019	78	46	50.8977364	W
703	2	53	44.6968313	78	46	50.2550733	W
704	2	53	44.6300217	78	46	49.3812738	W
705	2	53	44.8880837	78	46	48.215532	W
706	2	53	45.6690887	78	46	48.181643	W
707	2	53	46.0270785	78	46	48.1809456	W
708	2	53	46.2211982	78	46	47.5979478	W
709	2	53	46.0232535	78	46	46.2388877	W

710	2	53	45.3381609	78	46	45.3986612	W
711	2	53	45.6312528	78	46	45.4951934	W
712	2	53	44.2282682	78	46	43.6853343	W
713	2	53	44.325264	78	46	43.3614681	W
714	2	53	44.6822331	78	46	42.8428889	W
715	2	53	45.1705281	78	46	42.9066726	W
716	2	53	46.0488468	78	46	42.7107542	W
717	2	53	45.689773	78	46	42.1612029	W
718	2	53	45.7859393	78	46	41.4165578	W
719	2	53	43.0973699	78	46	47.8306067	W
720	2	53	42.8641406	78	46	45.0798042	W
721	2	53	41.9240464	78	46	46.9589631	W
722	2	53	42.4736064	78	46	45.080565	W
723	2	53	42.2430536	78	46	43.6892026	W
724	2	53	42.6649845	78	46	43.1057618	W
725	2	53	43.4427362	78	46	41.4211256	W
726	2	53	43.376244	78	46	40.7091658	W
727	2	53	43.3429978	78	46	40.353186	W
728	2	53	42.3962736	78	46	38.8661181	W
729	2	53	43.2428127	78	46	39.0586737	W
730	2	53	43.1761287	78	46	38.2496117	W
731	2	53	43.0415478	78	46	36.0165048	W
732	2	53	44.246267	78	46	36.3054641	W
733	2	53	44.9298921	78	46	36.4012337	W
734	2	53	45.6459978	78	46	36.4645721	W
735	2	53	43.8261247	78	46	37.7951967	W
736	2	53	43.8593073	78	46	38.1188088	W
737	2	53	43.9256086	78	46	38.7336656	W
738	2	53	43.9915908	78	46	39.1866846	W
739	2	53	44.0253474	78	46	39.8016049	W
740	2	53	43.9936961	78	46	40.2548144	W
741	2	53	45.1648507	78	46	40.0259571	W
742	2	53	46.9153593	78	46	36.5268311	W
743	2	53	47.1450218	78	46	37.4650464	W

744	2	53	47.8266041	78	46	36.5250532	W
745	2	53	48.6523426	78	46	42.6733108	W
746	2	53	47.3859778	78	46	44.1323283	W
747	2	53	46.9630906	78	46	44.2302558	W
748	2	53	46.7352153	78	46	44.1983322	W
749	2	53	46.4766449	78	46	45.105133	W
750	2	53	46.6393675	78	46	45.1048159	W
751	2	53	47.2570754	78	46	44.7799345	W
752	2	53	46.8044494	78	46	46.3021011	W
753	2	53	46.8059158	78	46	47.0465567	W
754	2	53	46.9686385	78	46	47.0462396	W
755	2	53	46.9045057	78	46	47.531881	W

GLOSARIO

	Español	Ingles
AMR	Lectura automática del medidor	Automatic Meter Reading
AON	Red Óptica Pasiva	Active Óptical Network
AWG	Arreglo de Guías de Onda	Arrayed waveguide gratings
BPON	Red Óptica Pasiva de Banda Ancha	Broadband Passive Optical Network
CAPEX	Gastos de Capital	Capital expenditure
DWDM	Multiplexado por División en Longitudes de Onda Densa	Dense Wavelength Division Multiplexing
EPON	Red Ethernet Óptica Pasiva	Ethernet Passive Optical Network
FSAN	Red de Acceso al Servicio	Full Service Access Network
FTTH	Fibra a la Vivienda	Fiber to the Home
FTTX	Fibra hacia ….	Fiber To The X
GePON	Red Óptica Pasiva Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GPON	Red Óptica Pasiva Gigabit	Gigabit Passive Optical Network
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles	Global System for Mobile Communications
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones	International Telecommunication Union
LTE	Evolución a largo plazo, en telecomunicaciones	Long Term Evolution
MILP	Programación Lineal Entera Mixta	Mixed-Integer Linear Programming
MPLS	Conmutación de etiquetas multiprotocolo	Multi protocol Label Switching
MSPT	Árbol de Proyección Estocástico Multietapa	Multistage Stochastic Projection Tree
MSTP	Árbol de Proyección Multi-Etapa	Multi-Stage Projection Tree
NLSE	Efecto No Lineal de Schrödinger	Nonlinear Schrödinger Equation
ODN	Red de Distribución Óptica	Optical Distribution Network
OLT	Terminación de línea Óptica	Óptical Line Termination
ONT	Terminación de Red Óptica	Óptical Network Termination
ONU	Unidad de Red Óptica	Óptical Network Unit
OPEX	Costos de Operación	Operating Expense
PDH	Jerarquía Digital Plesiocrona	Plesiochronous Digital Hierarchy
PON	Red Óptica Pasiva	Passive Óptical Network
QoS	Calidad de Servicio	Quality of Service
SDH	Jerarquía Digital Síncrona	Synchronous Digital Hierarchy
VANET	Redes Vehiculares Ad Hoc	Vehicular Ad Hoc Networks
WDM	Multiplexado por División en Longitudes de Onda	Wavelength Division Multiplexing

BIBLIOGRAFÍA

[1] K. Gerd, FTTX concepts and applications, John Wiley & Sons, 2006.

[2] FSAN, "Full Service Access Network," 2017. [Online]. Available: https://www.fsan.org/

[3] Mancero Baldeón, Luis Manuel (2013). Simulador multiplataforma para redes GPON. Maestría en Redes de Información y Conectividad. ESPE. Sede Sangolquí

[4] C. Vazques, *Tecnología Eléctronica*, 2017. *[Online]. Available: http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica*

[5] K. Shimomura and Y. Kawakita, "Wavelength selective switch using arrayed waveguides with linearly varying refractive index distribution," *Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation, IPAP Books*, vol. 2, pp. 341-354, 2005.

[6] J. C. Francoy, F. J. F. Peláez and J. M. Sendra, Dispositivos de comunicaciones ópticas, Síntesis, 1999.

[7] J. M. Senior and M. Y. Jamro, Optical Fiber Comunications: Principles and Practice, Pearson Education, 2009.

[8] G. Keiser, Optical Fiber Communication, McGraw-Hill series in Electrical Engineering, 1991.

[9] Peralta, A., Tipán, M. y Amaya, F. Análisis de los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos. Ingenius. N° 11, Enero, 2014, pp. 5–17, ISSN: 1390-650X

[10] I. Cale, A. Salihovic and M. Ivekovic, "Gigabit passive optical network-GPON," in *Information Technology Interfaces, 2007. ITI 2007. 29th International Conference on*, 2007.

[11] M. Abreu, A. Castagna, P. Cristiani, P. Zunino, E. Roldós and G. Sandler, "Características generales de una red de fibra óptica al hogar (FTTH)," *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, vol. 7, pp. 38-46, 2009.

[12] K. Grobe and J.-P. Elbers, "PON in adolescence: from TDMA to WDM-PON," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, 2008.

[13] *UIT-T G.984 SECTOR DE NORMALIZACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES DE LA UIT Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits*, 2003.

[14] M. Beck, Ethernet in the First Mile: The IEEE 802.3 ah EFM standard, McGraw Hill Professional, 2005.

[15] A. G. Peralta-Sevilla, F. Amaya-Fernandez and R. Hincapie, "Multiservice hybrid WDM/TDM-PON dimensioning using a heuristic method," in *Communications and Computing (COLCOM), 2014 IEEE Colombian Conference on*, 2014.

[16] A. Peralta-Sevilla and F. Amaya-Fernández, "Evolución de las redes eléctricas hacia Smart Grid en países de la Región Andina," in *Revista Educación en Ingeniería 8 (15),*, 2013.

[17] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal and R. Hincapié, "Optimum deployment of FiWi Networks using wireless sensors based on Universal Data Aggregation Points," in *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)*, 2015.

[18] B. Lin, J. Tapolcai and P.-H. Ho, "Dimensioning and site planning of integrated PON and wireless cooperative networks for fixed mobile convergence," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 4528-4538, 2011.

[19] X.-Z. Qiu, P. Ossieur, J. Bauwelinck, Y. Yi, D. Verhulst, J. Vandewege, B. De Vos and P. Solina, "Development of GPON upstream physical-media-dependent prototypes," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, p. 2498, 2004.

[20] J. D. Angelopoulos, H.-C. Leligou, T. Argyriou, S. Zontos, E. Ringoot and T. Van Caenegem, "Efficient transport of packets with QoS in an FSAN-aligned GPON," *IEEE Communications magazine*, vol. 42, pp. 92-98, 2004.

[21] B. Gavish, "Topological design of telecommunication networks-local access design methods," *Annals of Operations Research*, vol. 33, pp. 17-71, 1991.

[22] V. Autores, "Censo de Población y Vivienda," 2010. [Online]. Available: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/.

[23] V. Autores, "Boletín Estadístico del Sector de Telecomunicaciones," 2015. [Online]. Available: http://http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/11/Boletin6.pdf/.

[24] V. Autores, "Densidad de líneas telefónicas y participación de mercado (operador, provincia)," 2016. [Online]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/servicio-de-telefonia-fija//.

[25] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers and K. Ye, Probability and Statistics for Engineers and Scientists (9th Edition), 9 ed., Prentice Hall, 2011, pp. 88-90.

[26] C. C. Aggarwal and C. K. Reddy, Data Clustering: Algorithms and Applications, 0 ed., Chapman and Hall/CRC, 2013, pp. 33-35,88-91,103-109.

[27] Y. Donoso and R. Fabregat, Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics, 1 ed., Auerbach Publications, 2007, pp. 32-35.

[28] A. Benveniste, M. Métivier and P. Priouret, Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, 1 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990, pp. 22-29.

[29] E. Liberty, R. Sriharsha and M. Sviridenko, "An Algorithm for Online K-Means Clustering," in *2016 Proceedings of the Eighteenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)*, pp. 81-89.

[30] S. Dobrev, J. Edmonds, D. Komm, R. Královič, R. Královič, S. Krug and T. Mömke, "Improved analysis of the online set cover problem with advice," *Theoretical Computer Science*, 2017.

[31] R. Johnsonbaugh, Matemáticas discretas (4ª edición), 1 ed., Prentice Hall, 2000, pp. 81-89.

[32] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning," *Mathematical Programming*, vol. 52, pp. 359-375, May 1991.

[33] S. E. Shreve, Stochastic calculus for finance II Continuous time models, 1st ed. 2004. Corr. 2nd printing ed., Springer, 2004, pp. 83-88.

[34] W. Zhang, C. Zhang, C. Chen, H. Zhang and K. Qiu, "Brownian Motion Encryption for Physical-Layer Security Improvement in CO-OFDM-PON," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, pp. 1023-1026, June 2017.

[35] A. P. Sevilla, E. I. Ortega and R. Hincapie, "FiWi Network Planning for Smart Metering Based on Multistage Stochastic Programming," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, pp. 3838-3843, Dec 2015.

[36] E. Inga-Ortega, A. Peralta-Sevilla, R. C. Hincapie, F. Amaya and I. T. Monroy, "Optimal dimensioning of FiWi networks over advanced metering infrastructure for the smart grid," in *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015.

[37] R. a. O. W. a. (. M. G. S. Mansini, Linear and Mixed Integer Programming for Portfolio Optimization, 1 ed., Springer International Publishing, 2015.

[38] N. Growe-Kuska, H. Heitsch and W. Romisch, "Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems," in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003.