

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:  
DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE REDES PON CON OFICINAS CENTRALES  
REDUNDANTES PARA EL SECTOR DE IÑAQUITO DEL DISTRITO  
METROPOLITANO DE QUITO**

**AUTOR:  
ANDRÉS SEGUNDO JAMA GÓMEZ**

**TUTOR:  
GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO**

**Quito, marzo de 2017**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Andrés Segundo Jama Gómez, con documento de identificación N° 1723557003, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE REDES PON CON OFICINAS CENTRALES REDUNDANTES PARA EL SECTOR DE IÑAQUITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Nombre: Andrés Segundo Jama Gómez

Cédula: 1723557003

Fecha: Quito, marzo de 2017

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE REDES PON CON OFICINAS CENTRALES REDUNDANTES PARA EL SECTOR DE IÑAQUITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO realizado por Andrés Segundo Jama Gómez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo de 2017



Germán Vicente Arévalo Bermeo

Cédula de identidad: 0103152500

# DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE REDES PON CON OFICINAS CENTRALES REDUNDANTES PARA EL SECTOR DE IÑAQUITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

## OPTIMAL DIMENSIONING OF SURVIVABLE PON, WITH REDUNDANT CENTRAL OFFICES, FOR THE SECTOR IÑAQUITO IN THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO

Germán Vicente Arévalo Bermeo<sup>1</sup>, Andrés Segundo Jama Gómez<sup>2</sup>

### Resumen

El siguiente artículo presenta la investigación de la implementación de múltiples survivable-PON, con redundancia tanto en fibra óptica alimentadora como en Oficina Central (CO), para una amplia zona residencial-comercial en la ciudad de Quito. Para el efecto se empleó el software de mapas de libre edición y acceso OpenStreetMap (OSM) y el algoritmo de dimensionamiento óptimo de múltiples PON, Optimal Topology Search (OTS). En primera instancia se levantó la información de edificios y residencias en la zona de trabajo con el fin de disponer de una región con aproximadamente 105 potenciales usuarios. Posteriormente empleando OTS se evaluó la implementación de PON con topologías y costos óptimos para la región bajo estudio. Con el propósito de realizar un análisis comparativo del costo de implementación de diferentes tecnologías de redes PON, se compara la implementación de GPON, XGPON y NGPON2. Los resultados demuestran que a mayor demanda de bit rate por parte de los usuarios los costos de implementación de todas las tecnologías aumenta, exponencialmente para GPON y XGPON, mientras que NGPON2 incrementa de forma marginal el costo de su implementación.

**Palabras Clave:** Redundancia, GPON, XGPON, NGPON2, OTS, OSM.

### Abstract

The following manuscript presents the investigation of the implementation of multiple survivable-PON, with protection in feeder optical cables and in Central Office (CO), for a large residential-commercial area in the city of Quito. For this purpose real city maps data was retrieved from the OpenStreetMap (OSM) free-access mapping software. For the deployment costs analysis we employed the Optimal Topology Search (OTS) optimization algorithm. In the first instance, it was configured the OSM information regarding buildings and residences in the work area, in order to have a region with approximately 105 potential users. Subsequently it was evaluated the optimal deployment of PON, for the region under study was, using OTS. In order to perform a comparative analysis of the implementation costs for different PON network technologies, the implementation of GPON, XGPON and NGPON2 was compared. The results show that as the bit rate demand increases, the deployment cost increases, exponentially for GPON and XGPON, whilst for NGPON2 the deployment cost increases marginally.

**Keywords:** Redundant, GPON, XGPON, NGPON2, OTS, OSM.

---

<sup>1</sup> Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones – Escuela Politécnica Nacional, Máster en comunicaciones y Tecnologías Fotónicas – Politecnico di Torino, Doctorado en Ingeniería – Universidad Pontificia Bolivariana.  
Correo electrónico: garevalo@ups.edu.ec

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica - Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador  
Correo electrónico: andresjamagomez@gmail.com

## 1. Introducción

Las redes ópticas pasivas (Passive Optical Network - PON) son redes que permiten implementar servicios de fibra hasta el hogar (Fiber-To-The-Home - FTTH) con gran ancho de banda a los abonados y están compuestas por elementos pasivos tales como: fibras monomodo y splitters ópticos. En el lado del proveedor de servicios, el transmisor-receptor de datos ópticos se denomina el terminal de línea óptica (Optical Line Terminal – OLT). En el lado del usuario el transmisor-receptor de datos ópticos se denomina la unidad óptica de red (Optical Network Unit - ONU) [1].

Las redes de distribución óptica (Optical Distribution Network - ODN) de una PON actualmente se implementan con splitters del tipo 1:N (una entrada, N salidas). La ODN consta de una sola fibra óptica alimentadora (Feeder Optical Fiber – Feeder-OF), de varios km de longitud, que llega desde la Oficina Central (Central Office - CO), donde el proveedor de servicios tiene instalados los OLT, hasta un nodo de distribución remoto ubicado en un gabinete de calle primario (Primary Street Cabinet – PSC) y desde ese splitter se enruta la ODN hacia las ONU utilizando fibras ópticas de distribución de última milla.

Generalmente antes de llegar al usuario final se llega primero a un segundo splitter ubicado en los predios donde el usuario se encuentra (casas, edificios, acceso a condominios, edificios o campus residenciales o corporativos, etc.). Ese segundo splitter se ubica en el denominado gabinete de calle secundario (Secondary Street Cabinet – SSC), mismo que se encuentra emplazado en los puntos de acometida de casas, campus o edificios. Con este tipo de infraestructura hay inconvenientes en el funcionamiento de la red si se pierde la comunicación desde y hacia la CO (sea por fallas en las OLT o rotura de la Feeder-OF) [1].

El PhD. Germán Arévalo, investigador y coordinador del Grupo de Investigación en Electrónica y Telemática (GIETEC) de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), en un trabajo colaborativo con el Grupo de Investigación en Comunicaciones Ópticas (OPTCOM) del Politécnico de Turín (Italia), desarrolló el algoritmo “Optimal Topology Search - OTS” (búsqueda de la topología óptima) mismo que calcula topologías óptimas para la implementación de redes PON a partir de información de mapas reales generados por la aplicación OpenStreetMap ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)) misma que ofrece un espacio colaborativo para crear mapas y permite editar zonas determinadas para proyectos de investigación. OTS ha sido probado para dimensionar óptimamente redes PON tradicionales (sin redundancia) en ciudades como Roma, Turín y Medellín (Colombia) [2].

Una solución al problema de pérdida de conectividad para un gran número de usuarios frente a fallas de comunicación con la CO en PON es dar redundancia (robustez) a la red. Una alternativa es utilizar splitters ópticos del tipo 2:N (2 entradas, N salidas) en el PSC de tal modo que al splitter de primer nivel lleguen dos Feeder-OF desde dos CO distintas.

La redundancia presenta un desafío de diseño importante considerando las rutas urbanas que tendrán que cruzar las fibras de la red, para lo cual es necesario emplear métodos que permitan una implementación eficiente de recursos, aprovechando el trenching por donde van las Feeder-OF principales para enviar las de backup.

Este artículo científico está enfocado en evaluar y reportar la implementación óptima de redes PON en la ciudad de Quito con redundancia en fibras alimentadoras y redundancia en CO. Para el efecto se estudiará el despliegue de estándares PON actuales como, GPON (Gigabit PON), XGPON (10Gigabit PON) y NGPON2 (Next Generation PON - version 2).

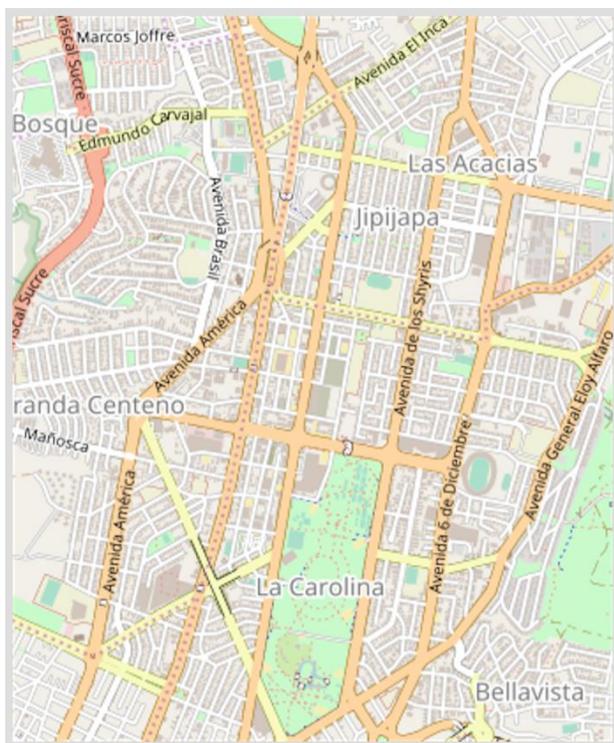
## 2. Parámetros de la Red

### 2.1 Estimación de la zona y abonados

En el Distrito Metropolitano de Quito la zona de implementación del algoritmo comprende el sector de la parroquia Iñaquito y sus alrededores conformados por barrios con gran cantidad de abonados residenciales y corporativos.

Para los resultados en cuanto a la optimización de costos de estándares PON se cuenta con 105 potenciales usuarios, esta información se la consiguió de OSM al generar los datos de mapeo, identificando el contorno de las infraestructuras dentro del mapa georreferenciado, detallando los niveles de cada edificación (pisos) y el tipo (residencial: casas y apartamentos, y corporativo: edificio comercial), con la ayuda de Street View, una herramienta de Google Earth, que permite recorrer las ciudades desde las calles y observar la diversidad de edificaciones.

En la Figura 1 se presenta la zona de mapeo que corresponde al sector de la parroquia de Iñaquito, y sus alrededores.



**Figura 1.** Zona de mapeo en el sector de la Parroquia de Iñaquito y sus alrededores [6].

### 2.2 Costos referenciales

La optimización de costos es calculada mediante los parámetros establecidos en el algoritmo OTS, siendo una herramienta que permite buscar las rutas óptimas de implementación de estándares PON, calculando costos de: trenching, ODN, hardware y ONU.

**Tabla 1.** Costos referenciales usados por OTS en cuanto cable de fibra alimentadora (depende del número de hilos a emplearse), instalación, trenching, fusiones de fibra y mano de obra [2].

COMPONENTE	COSTO (\$)
Fibra alimentadora/km, 2 núcleos	600
Fibra alimentadora/km, 4 núcleos	800
Fibra alimentadora/km, 6 núcleos	1000
Fibra alimentadora/km, 12 núcleos	1500
Fibra alimentadora/km, 24 núcleos	2000
Fibra alimentadora/km, 48 núcleos	2500
Fibra alimentadora/km, 64 núcleos	3000
Fibra alimentadora/km, 96 núcleos	3500
Fibra alimentadora/km, 144 núcleos	3700
Fibra alimentadora/km, 288 núcleos	4000
Fibra de distribución/km	2000
Instalación del interior/usuario	50
Trenching and reinstatement/km	30000
Conductos y fenders/km	10000
Fusiones y slicing/unidad	10
Mano de obra /unidad	500

**Tabla 2.** Costos referenciales usados por OTS para los racks principales y de Backup, splitters ópticos (1:N-2:N), e instalación del gabinete de calle de cable y tendido de fibra usados por OTS [2].

COMPONENTE	COSTO (\$)
Caja de conexiones 144 OF	500
Caja de conexiones 48 OF	400
Caja de conexiones 16 OF	350
Caja de conexiones 8 OF	300
Splitter 2:64	120
Splitter 2:32	70
Splitter 2:16	45
Splitter 2:8	28
Splitter 2:4	24
Splitter 2:2	20
Instalación del Gabinete	1600

**Tabla 3.** Costos referenciales por OTS para la implementación de las ONU, OLT, costo de trabajo en la CO y ODF por rack [2].

COMPONENTE	COSTO (k\$)
Rack OLT – GPON (103) usuarios	16.0
Rack OLT – XGPON (103) usuarios	28.0
Rack OLT – NGPON2 (103) usuarios	50.0
Tarjeta OLT – 4xGPON	9.0
Tarjeta OLT – 4xXGPON	15.0
Tarjeta OLT – 4xNGPON2	25.0
ONU Residencial - GPON	0.1
ONU Residencial - XGPON	0.35
ONU Residencial – NGPON2	0.6
ONU Corporativa - GPON	0.35
ONU Corporativa - XGPON	0.6
ONU Corporativa – NGPON2	1.1
Conexión de fibra a la CO	2.8
Splicing/per splice	0.01
Costo de trabajo en la CO	2.0
ODF en la CO (por rack)	3.5

## 2.3 Estándares PON

**Tabla 4.** Análisis comparativo de los estándares GPON, XGPON y NGPON2; en cuanto al número de usuarios que soportan, bit rate y principales parámetros [3]-[5].

PARÁMETROS	TECNOLOGÍA		
	GPON	XGPON	NGPON2
Número Usuarios	64	64	64
Bit rate Downstream	1,2-2,4 Gbit/s	10 Gbit/s	40-10-2,5 Gbit/s
Bit rate Upstream	155-622 Mbit/s; 1,2-2,4 Gbit/s	2,5-10 Gbit/s	40-10-2,5 Gbit/s
Acceso	TDMA	TDMA	TWDM-PON, PtP-WDM
Recomendación	UIT-T G.984.1	UIT-T G.987.1	UIT-T G.989.1
Servicios	Soporta todos los servicios		

## 3. Simulación y Análisis de Resultados

### 3.1 Trazado de la red

La CO se encarga del enrutamiento de los hilos de fibra hacia los PSC en los cuales se encuentran splitters de 1:N (una entrada con n salidas), los que permiten conectar con los SSC que poseen splitters de 1:N, los parámetros para establecer una PON (conjunto de usuarios corporativos y residenciales) depende del número de usuarios y el bit rate que soporta cada estándar (GPON, XGPON y NGPON), es decir dependiendo de la demanda de bit rate por parte de los usuarios una PON puede estar conformada por menos usuarios establecidos por el estándar. Los SSC se colocan en la acometida de cada edificio o en un conjunto de casas residenciales.

La redundancia se basa en colocar un splitter de 2:N (2 entradas con n salidas) en los PSC, el algoritmo OTS se encarga de buscar la segunda ruta más óptima de los PSC perteneciente a la CO1 que se conectaran con la CO2 más cercana, como se visualiza en el diagrama de la topología de PON múltiples con redundancia en la fibra óptica alimentadora y en el CO en la figura 2.

En la CO se encuentran dos racks: el principal que enruta desde cada OLT cable de fibra alimentadora a los Gabinetes de Calle Primarios PSC, el segundo rack o de backup (redundancia) direcciona desde cada OLT cable de fibra alimentadora hacia las PSC para dar robustez. Los splitters 2:N se encuentran ubicados en los PSC los cuales constan de 2 entradas (a la primera entrada llega el cable de fibra principal y a la segunda entrada llega el cable de fibra de Backup) y N salidas que se distribuyen dependiendo el número de PONs a cubrir por la CO de esa zona.

Desde los PSC hacia los SSC se enruta cable de fibra óptica de distribución y en los SSC se encuentran splitters de 1:N los cuales dividen los hilos de fibra a cada una de las ONU de los usuarios residenciales y corporativos (en el caso de un edificio corporativo solo va hacia una ONU).

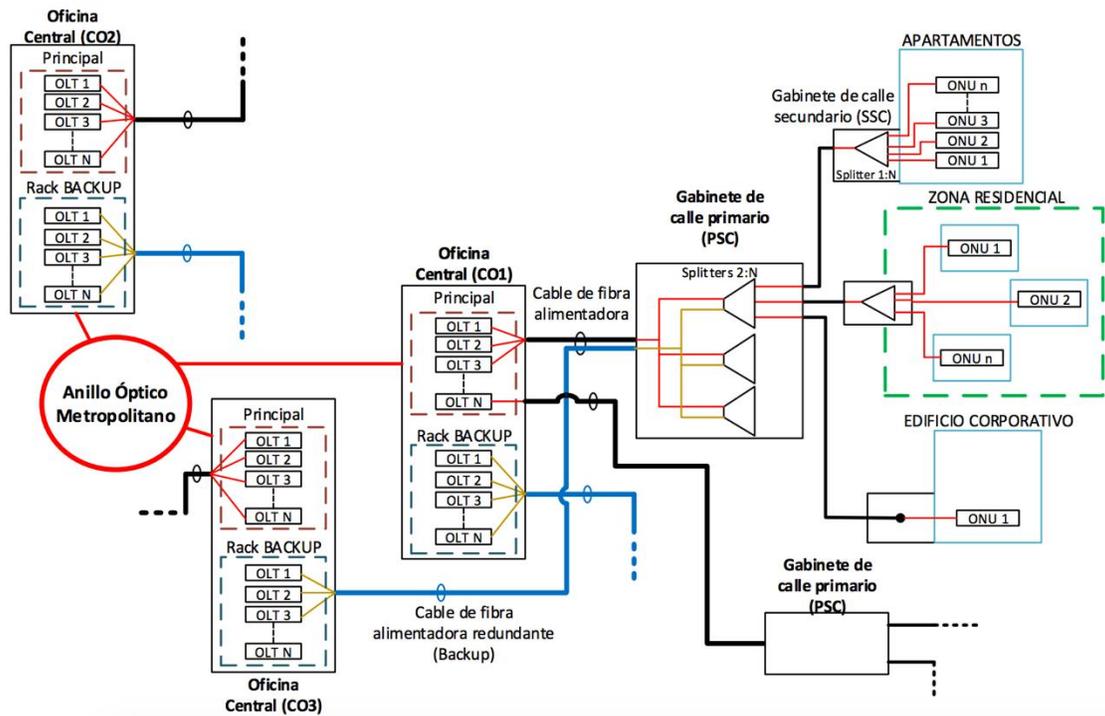


Figura 2. Diagrama de la topología de PON múltiples con redundancia en fibra óptica alimentadora y en CO.

### 3.2 Simulación sin Redundancia

Los resultados obtenidos al correr el algoritmo OTS con la información de OSM de las edificaciones, se lo realizó para cada una de las tecnologías como se detalla en la tabla 5, OTS proporciona aleatoriamente cada bit rate a cada usuario dependiendo del escenario a emplearse.

Al cargar la imagen de la zona de cobertura de los 105 potenciales usuarios OTS permite ubicar manualmente las CO (empleando el software de aplicación MATLAB), para simular los diferentes estándares PON se ha ubicado en el mapa cinco CO soportando cada una el tráfico de aproximadamente 20000 abonados; en la figura 3 se observa las zonas pertenecientes a cada CO diferenciadas por colores, en las avenidas y calles de la zona de mapeo se presenta un trazado de fibra alimentadora de color rojo que conecta a cada CO con sus respectivos PSC de la zona de cobertura.

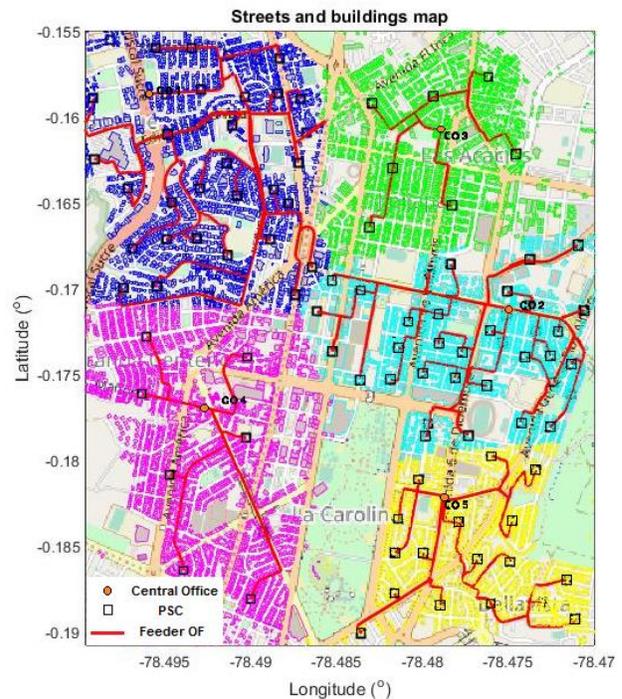
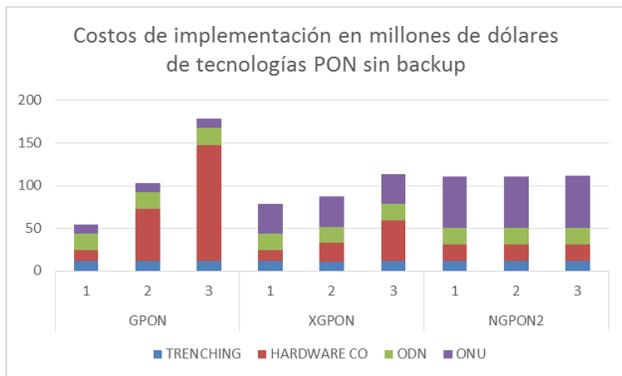


Figura 3. Diagrama de trazado de las zonas de cobertura de las CO y el tendido de fibra hasta los PSC, resultados obtenidos sin backup con la tecnología NGPON2 para el segundo bit rate escenario.

**Tabla 5.** Valores máximos de bit rate en Gb/s asignados a usuarios residenciales y corporativos en cada escenario.

Escenario de bit rate	Usuario Residencial	Usuario Corporativo
1	0.1 Gb/s	1 Gb/s
2	0.4 Gb/s	2.5 Gb/s
3	1 Gb/s	10 Gb/s

En la figura 4 se detallan los resultados obtenidos por OTS sin backup, en los tres escenarios de bit rate, con los costos de implementación en millones de dólares en cuanto a trenching, hardware, ODN y ONU para las tecnologías GPON, XGPON y NGPON2. Se observa como, en la medida que la demanda de ancho de banda (bit rate) crece, el costo total de despliegue crece exponencialmente para GPON y XGPON, mientras que para NGPON2, en los tres escenarios de bit rate, se mantiene prácticamente constante. Se evidencia que el aumento del costo de implementación se debe especialmente al aumento del hardware de la CO.

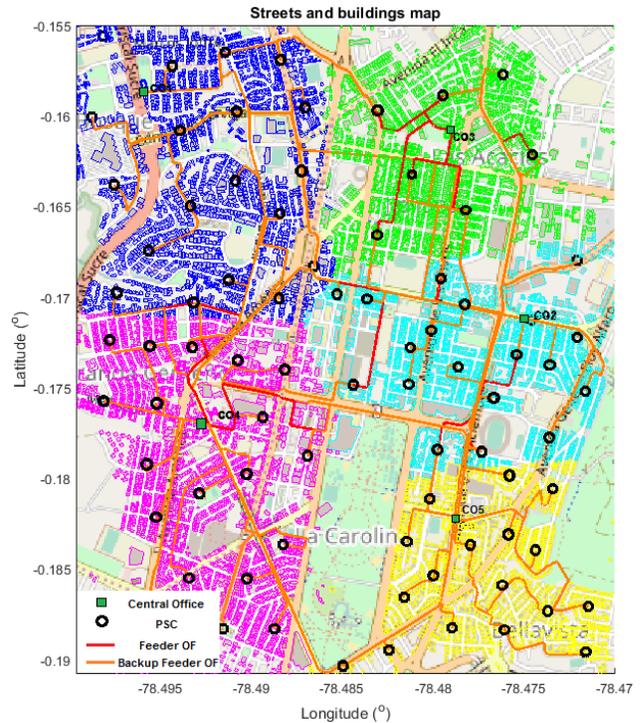


**Figura 4.** Costos de implementación, en millones de dólares, de tecnologías PON en tres escenarios de demanda de bit rate por parte de los usuarios residenciales y corporativos.

### 3.3 Simulación con Redundancia

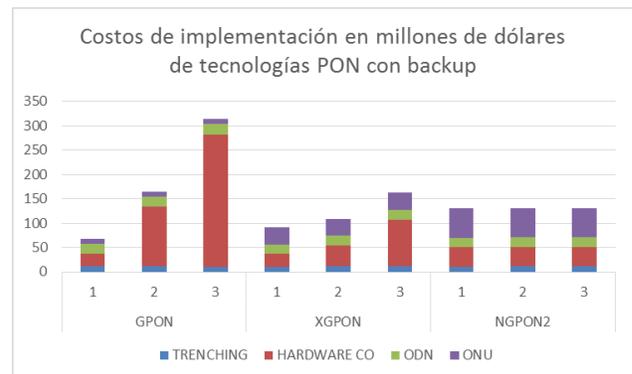
Al realizar la simulación con Backup (redundancia) usando OTS se consideró los tres bit rate escenarios, en este caso OTS calcula la segunda CO más cercana para conectarse con los PSC de la CO principal.

Al correr el algoritmo con backup se presenta las zonas pertenecientes a las CO de diversos colores y el tendido de fibra óptica alimentadora de backup de color naranja como se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Diagrama de trazado de las zonas de cobertura de las CO y el tendido de fibra hasta los PSC, resultados obtenidos con backup con la tecnología NGPON2 para el primer bit rate escenario.

En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos por OTS con backup en los tres escenarios de bit rate y los costos de implementación en millones de dólares en cuanto a trenching, hardware, ODN y ONU para las tecnologías GPON, XGPON y NGPON2.



**Figura 6.** Costos de implementación, en millones de dólares, de tecnologías PON en tres escenarios de demanda de bit rate con oficinas centrales redundantes.

Los resultados muestran que el porcentaje de aumento de la solución con redundancia, al respecto de la solución sin redundancia, para cada tecnología es: para GPON, un aumento en los escenarios 1, 2 y 3 de demanda de bit rate de 25%, 61% y 76% respectivamente. Para XGPON un aumento de 17%, 26% y 44%. Para NGPON2 el aumento es del 18% en cualquiera de los tres escenarios.

#### **4. Conclusiones**

En la implementación de tecnologías PON con y sin backup, GPON es la tecnología más baja en costos en el primer escenario de bit rate, que corresponde a un escenario de demanda actual. A medida que la demanda de bit rate se incrementa, el costo de implementación de esta tecnología se eleva comparado con los estándares XGPON y NGPON2, en el tercer escenario de demanda de bit rate, que corresponde a un escenario de largo plazo, los usuarios residenciales y corporativos demandan hasta 1 Gb/s y 10 Gb/s respectivamente. En base a lo planteado la mejor opción es NGPON2 debido a que el bit rate es de 40 Gb/s, es decir permite tener más usuarios, demandando mayor capacidad de bit rate en una PON.

Al comparar los valores dados por OTS, se puede concluir que la variable que tiene mayor impacto en el incremento del costo de despliegue de una determinada tecnología PON, es el costo del hardware de la CO, es decir del costo de las OLT. Esto se debe a que con el aumento de la demanda de ancho de banda en contraposición con la capacidad fija de una tecnología, se tiene que aumentar en hardware de OLT para responder al incremento de la demanda de capacidad.

En zonas estratégicas se podría utilizar una redundancia extra que se conecte de la tercera CO más cercana a los PSC de la CO principal, es decir en un sector con mayor prioridad de servicio, como por ejemplo oficinas gubernamentales que frente a ataques de disponibilidad de la red en la CO principal y la redundancia, entre a soportar todo el

tráfico la redundancia extra, esto sería factible al implementar splitters NxN en los PSC.

#### **Referencias**

- [1] G. Arévalo, J. Sierra, and R. Hincapié, “ILP model for Greenfield WDM PON network design based on physical layer constraints.pdf,” in Proc. SPIE 8842, Novel Optical Systems Design and Optimization XVI, 88420F, 2013, vol. 8842, no. 0, pp. 1–6.
- [2] G. V. Arévalo, R. C. Hincapié, and J. E. Sierra, “Optimization model for UDWDM-PON deployment based on physical restrictions and asymmetric users’ clustering,” in Proc. SPIE 9626, Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI, 2015, vol. 9626, pp. 1–11.
- [3] ITU-T, “Recommendation G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,” pp. 1-43, 2008.
- [4] ITU-T, “Recommendation G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements,” pp. 1-52, 2010.
- [5] ITU-T, “Recommendation G.987.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements,” pp. 1-17, 2013.
- [6] OSM, OpenStreetMap, [online]: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)