

Diseño Topológico de una Red de Acceso Optimizada

TEL317 - Redes Ópticas WDM

Benjamín Espinoza
*Departamento de
Electrónica
UTFSM*
Santiago, Chile
benjamin.espinozap@usm.cl

Pedro Arce
*Departamento de
Electrónica
UTFSM*
Santiago, Chile
pedro.cisternasa@usm.cl

Juan Mamani
*Departamento de
Electrónica
UTFSM*
Santiago, Chile
juan.mamani@usm.cl

Diego De La Sotta
*Departamento de
Electrónica
UTFSM*
Santiago, Chile
diego.delasotta@usm.cl

I. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LA TECNOLOGÍA CONSIDERADA

El crecimiento exponencial de la demanda de servicios de alta velocidad en áreas urbanas, como Santiago, ha generado una necesidad urgente de desarrollar infraestructuras de red eficientes y escalables. La creciente densidad de usuarios en áreas como Ñuñoa, San Joaquín y Macul exige soluciones tecnológicas capaces de ofrecer servicios de alta calidad sin comprometer la sostenibilidad económica ni la eficiencia operativa de la red.

En este contexto, el diseño de redes de acceso ópticas se presenta como una solución eficaz para satisfacer esta demanda. Las redes de acceso ópticas permiten ofrecer altos anchos de banda y baja latencia mediante el uso de fibra óptica, la cual es capaz de transmitir grandes volúmenes de datos a largas distancias con una pérdida mínima de calidad. Sin embargo, el desafío radica en optimizar el uso de los recursos físicos de la red, principalmente la cantidad de fibra óptica y los dispositivos divisores (splitters), sin comprometer la calidad del servicio (QoS).

Componentes de la Red de Acceso Óptica

En el diseño de redes ópticas de acceso, los componentes principales incluyen:

- **Fibra Óptica:** El medio de transmisión utilizado para conectar los nodos de la red. La fibra monomodo es la más adecuada para este tipo de redes, ya que permite una transmisión eficiente a largas distancias con baja atenuación.
- **OLT (Optical Line Terminal):** Dispositivo central encargado de la gestión y control de las comunicaciones entre la red de acceso y la red troncal. La OLT distribuye las señales hacia los diferentes usuarios de la red.
- **ONU (Optical Network Unit):** Dispositivo en el extremo de la red que se conecta a cada usuario. Cada ONU recibe

y transmite datos a través de la fibra óptica, permitiendo la conexión a la red de acceso.

- **Splitters:** Dispositivos que permiten dividir la señal óptica proveniente de la OLT hacia múltiples ONUs, lo que facilita la distribución de la señal a varios usuarios sin la necesidad de cables adicionales.

Escenario y Operación de la Red

El escenario considerado en este proyecto involucra un entorno urbano con una alta densidad de usuarios, como el área de Santiago y sus alrededores. En este contexto, se busca diseñar una red de acceso óptica que minimice la cantidad de fibra óptica y splitters requeridos, garantizando al mismo tiempo que se cumpla con los estándares de calidad de servicio (QoS) exigidos para una experiencia de usuario óptima.

La operación de la red se basa en la distribución de la señal óptica desde la OLT a través de la fibra, utilizando los splitters para dividir la señal en rutas hacia las diferentes ONUs. El diseño de la topología de la red debe garantizar que los enlaces sean lo más cortos posible para reducir la cantidad de fibra utilizada, sin sacrificar la cobertura ni la capacidad de la red.

Tecnología Considerada

Para el diseño de la red, se ha considerado el uso de dos tecnologías clave: **Árbol de Recubrimiento Mínimo (MST)** y **Heurísticas**.

- **Árbol de Recubrimiento Mínimo (MST):** Utilizado para determinar la topología óptima de la red minimizando la longitud total de los enlaces, lo que reduce la cantidad de fibra necesaria para conectar todos los nodos. Los algoritmos de Kruskal y Prim son eficaces en la resolución de este problema.
- **Heurísticas:** En este caso, utilizamos el algoritmo de K-Means, para realizar clustering de los nodos de los grafos y así poder determinar las ubicaciones óptimas de los splitters dentro de la red.

II. OBJETIVO

Optimizar el diseño topológico de una red óptica de acceso, minimizando el uso de fibra y splitters, y garantizando altos estándares de QoS. Se espera obtener una red escalable y costo-efectiva que permita bajas latencias, rutas óptimas y una capacidad de transmisión adecuada para las necesidades de los usuarios en áreas urbanas.

III. MÉTODOS

Para resolver el problema del diseño óptimo de la red de acceso, se emplearon los siguientes métodos y enfoques:

A. Optimización con Árbol de Recubrimiento Mínimo (MST)

- **Objetivo:** Minimizar la longitud total de los enlaces entre los nodos de la red, utilizando los algoritmos de Kruskal y Prim.
- **Método:** Implementar el algoritmo MST para generar una topología eficiente que conecte todos los nodos, reduciendo la cantidad de fibra óptica necesaria y optimizando la distribución de los recursos.

B. Clustering de Nodos con K-Means

- **Objetivo:** Determinar las ubicaciones óptimas de los splitters dentro de la red.
- **Método:** El algoritmo K-Means se utiliza para realizar el clustering de los nodos del grafo, agrupando los nodos cercanos entre sí. Los centros de cada clúster se consideran como ubicaciones candidatas para los splitters, lo que permite distribuirlos de manera eficiente, minimizando la latencia y mejorando el rendimiento de la red.

C. Simulaciones y Evaluación del Rendimiento

- **Objetivo:** Evaluar el rendimiento de la red diseñada en términos de latencia y tasa de transmisión.
- **Método:** Se implementan simulaciones en Python para comparar las diferentes configuraciones de red y verificar el cumplimiento de los estándares de calidad de servicio (QoS). Las métricas clave a evaluar incluyen la latencia, los costos y la tasa de transmisión.

D. Modelado Inicial

El proceso comienza con la construcción de un grafo $G = (N, E)$, donde:

- N : Nodos que representan usuarios y posibles ubicaciones de splitters y OLT/ONUs.
- E : Aristas que representan las rutas posibles con pesos asociados al costo de despliegue.

El grafo se genera utilizando un modelo de triangulación de Delaunay para representar las rutas posibles entre los nodos, o se pueden emplear datos reales si están disponibles.

E. Clustering de Usuarios

Para agrupar a los usuarios, se aplica el algoritmo de **K-Means**, el cual genera clústeres que representan áreas atendidas por los splitters de segunda etapa. El centro de cada clúster se considera como un candidato para la ubicación de los splitters, lo que permite una distribución eficiente y optimizada.

F. Optimización de Splitters

Una vez definidos los clústeres, se determinan las ubicaciones óptimas de los **splitters de primera etapa** para conectar los clústeres de usuarios con la OLT. Para esto, se utiliza el **Árbol de Steiner**, que permite minimizar la longitud total de fibra entre los splitters y la OLT, respetando las restricciones de capacidad y distancia máxima para cada splitter.

G. Cálculo de Rutas Óptimas

El algoritmo de **Dijkstra** se aplica para determinar las rutas óptimas en la red:

- Desde los usuarios hasta los splitters de segunda etapa.
- Desde los splitters de segunda etapa hasta la OLT.

Las rutas se optimizan para minimizar los costos de fibra, respetando las restricciones de latencia y distancia.

H. Evaluación de Métricas

Se realizan las siguientes evaluaciones para determinar el desempeño global de la red:

- **Latencia:** Se calcula la latencia total y promedio de la red para asegurar que cumple con los requisitos de QoS.
- **Costos:** Se evalúan los costos totales del diseño, que incluyen tanto el costo de la fibra óptica como de los splitters y su instalación.
- **Tasa de Transmisión:** Se simula la tasa de transmisión alcanzable para validar que la red pueda manejar el volumen de tráfico esperado.

Estas métricas optimizan el diseño y garantizan el cumplimiento de los estándares de la red.

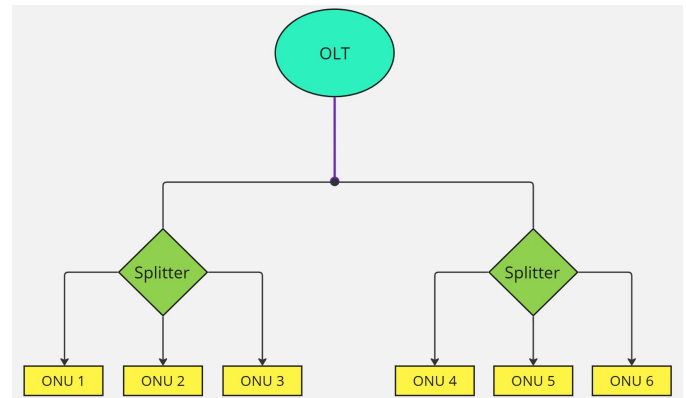


Fig. 1. Diagrama de los componentes y elementos necesarios para ejecutar el problema, mostrando la conexión entre la OLT, los splitters y las ONUs.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación inicial, que constituye la base para evaluar la metodología utilizada en el diseño de la red.

La figura 2 muestra el grafo inicial generado a partir de los datos de simulación, donde se incluyen los nodos que representan los usuarios y la OLT, así como las conexiones posibles con sus respectivos costos asociados. Los nodos en azul representan a los usuarios, y el nodo en rojo es la OLT. Las conexiones indican rutas posibles entre los nodos, con pesos que reflejan los costos asociados a cada enlace.

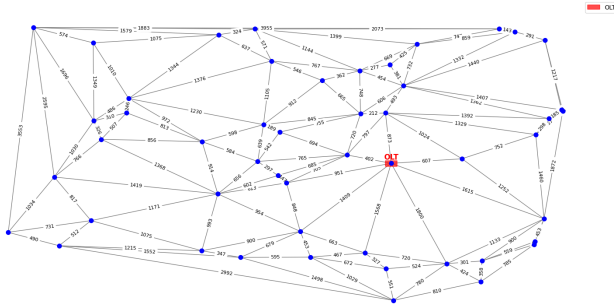


Fig. 2. Grafo inicial de la red basado en la simulación.

Este grafo proporciona las bases para aplicar los algoritmos de clustering (K-Means) y optimización (Árbol de Steiner), los cuales permiten obtener la topología final de la red optimizada.

A continuación, en la figura 3, se muestra el resultado del clustering realizado sobre los nodos, donde cada clúster está representado por un color diferente. Los splitters se han asignado a las posiciones de los centros de los clústeres, y se destacan con el color rojo. Este paso de agrupamiento es fundamental para optimizar la distribución de los recursos y minimizar la latencia.

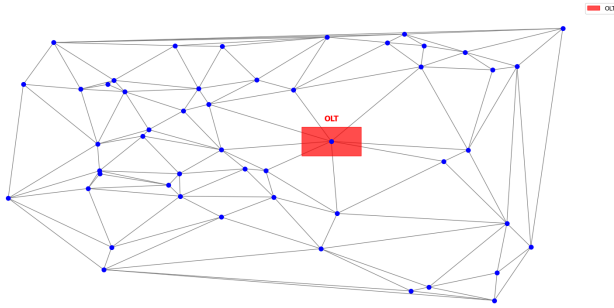


Fig. 3. Resultados del clustering: los clústeres se indican por colores y los splitters están marcados en rojo.

Por último, en la figura 4, se presenta el grafo optimizado después de aplicar el Árbol de Steiner y otras técnicas de optimización. Este grafo muestra las rutas finales entre los usuarios, los splitters y la OLT, con conexiones ajustadas para minimizar el costo total de la fibra óptica.

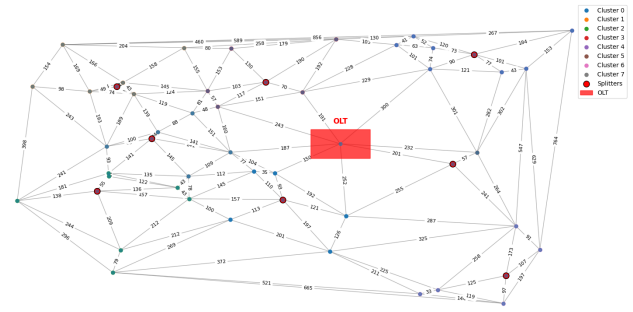


Fig. 4. Grafo optimizado: se muestran las rutas finales entre usuarios, splitters y la OLT, con conexiones ajustadas para minimizar los costos.

Estos resultados validan el diseño de la red optimizada, demostrando la eficacia del método utilizado para mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados a la infraestructura de la red.

V. TRABAJO FUTURO

Aunque se han logrado avances importantes, aún hay áreas clave que requieren optimización para mejorar los resultados y asegurar la implementación eficiente de la red:

- **Optimización de la Distribución de Splitters:** Se puede mejorar el clustering de los splitters utilizando algoritmos más avanzados para aumentar la eficiencia en redes con alta densidad de usuarios.
- **Factores Geográficos y Topológicos:** Integrar análisis geográficos y topológicos reales para mejorar la distribución de los recursos y hacer la red más económica.
- **Simulación de Tráfico Real:** Incluir simulaciones de tráfico dinámico para validar el rendimiento de la red en situaciones de carga elevada o fallos.
- **Escalabilidad y Adaptabilidad:** Estudiar cómo escalar la red para grandes áreas y más usuarios, explorando tecnologías como SDN o virtualización.

VI. APRECIACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Este proyecto ha sido una experiencia valiosa para el equipo. Nos permitió aplicar conceptos clave en redes ópticas y optimización, especialmente a través del clustering de nodos y el Árbol de Steiner.

Lo más difícil fue realizar la simulación del grafo optimizado en Python, ya que requería que todas las rutas fueran correctas y cumplieran con las restricciones de latencia y capacidad. A pesar de los desafíos, fue una excelente oportunidad para mejorar nuestras habilidades técnicas y aprender a superar obstáculos juntos.

En resumen, este trabajo nos enseñó a abordar problemas complejos de manera colaborativa y a aplicar soluciones prácticas en el campo de las telecomunicaciones.