

Metaheurísticas y Optimización sobre Redes

(Obligatorio 2019)

30 de setiembre de 2019

Considere el problema de diseñar la *ingeniería de tráfico para una red IP/MPLS de tránsito internacional*. Todo backbone de telecomunicaciones moderno es en realidad una superposición de capas (i.e. overlays), de distinta naturaleza física y tecnológica. Una lista representativa de esas capas comprende los siguientes niveles: i) el nivel óptico (también referido como nivel físico) está compuesto por las fibras y los cross-conectores ópticos que permiten implementar los enlaces de la red sobre enormes distancias; ii) la red de datos (también referida como nivel lógico) está compuesta por routers/switches MPLS (los nodos cumplen ambas funciones) y las conexiones entre ellos, que se soportan a su vez en la red óptica; iii) los túneles IP/MPLS son los circuitos lógicos a través de los que fluyen los paquetes entre los nodos de la red, i.e., soportan la función de forwarding; iv) la estructura de caminos a ser usados por los túneles anteriores; v) la capa de enrutamiento BGP-IP (fuera del alcance de este obligatorio). La Figura 1 esquematiza las capas a considerar.

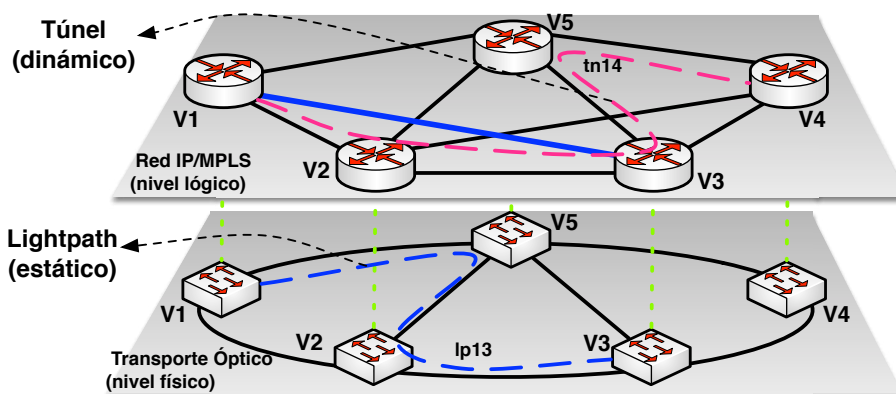


Figura 1: Esquema de niveles físicos y lógicos

Las conexiones entre nodos del nivel lógico se implementan con un camino estático en la red óptica. En el esquema del ejemplo, el enlace lógico entre los nodos V1 y V3 sigue en realidad el camino físico: V1, V5, V2 y V3. Una falla en cualquiera de esos tramos deja fuera de servicio al enlace V1-V3. A su vez, el tráfico sobre la red de datos circula en túneles, cuyos caminos son dinámicos. Volviendo al ejemplo de Figura 1. En una red de tránsito IP/MPLS como la del esquema, el ingreso de un paquete IP a V1 desencadena la siguiente secuencia

de eventos: la dirección destino del paquete es inspeccionada para determinar su gateway y se concluye que es V4 (este proceso de routing no es parte del obligatorio); se encapsula el paquete IP en un frame MPLS con la etiqueta que identifica el túnel desde V1 a V4; se envía a V2, porque figura como el siguiente nodo en el camino al destino; V2 analiza la etiqueta solamente y con ella determina que debe enviarlo a V3 (forwarding); V3 hace lo propio hacia V5 y finalmente V5 envía el paquete a V4. A diferencia de los *lightpaths*, los caminos de los *túneles* son dinámicos, siendo el nivel lógico el que ofrece protección ante fallas físicas.

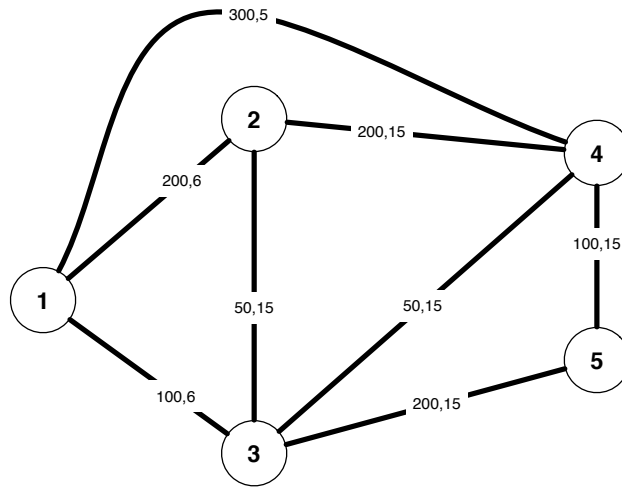


Figura 2: Ejemplo, topología lógica de referencia

Supongamos por el momento que las conexiones del nivel lógico son físicamente independientes¹, y que la topología de la red de datos es conocida y es la indicada en Figura 2. Cada enlace de la figura tiene una etiqueta con dos valores. El primero corresponde al *delay de propagación*, que depende del *largo físico*, por lo que nos referiremos a ambos indistintamente. La segunda etiqueta corresponde a la capacidad del enlace, esto es, a la cantidad de tráfico que puede atravesarlo antes de hacerlo entrar en congestión. Se asume que hay una matriz de demandas de tráfico entre nodos a cumplir, y que hay límites máximos en los delays punta-a-punta de los caminos. Nuestro problema es el diseñar una estructura de caminos: primario y secundario para cada túnel, físicamente independientes entre sí, que respeten los límites de delay, al tiempo que permitan cursar el tráfico sin congestionar ningún enlace de la red ante cualquier falla física. Frente a una falla en el camino primario, la red switchea automáticamente al otro. Continuando con el ejemplo previo (Figura 2), supongamos que las matrices en Tabla 1 son las de demanda y límites de delay.

¹Esto es que, una falla física afecta a lo sumo a un enlace lógico.

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1	0	0	2	3	3	1	0	0	250	400	450
2	0	0	2	3	3	2	0	0	250	200	300
3	2	2	0	5	3	3	250	250	0	250	200
4	3	3	5	0	3	4	400	200	250	0	250
5	3	3	3	3	0	5	450	300	200	250	0

Table 1: Demandas entre nodos [izquierda] y límites de delay [derecha]

Se puede verificar que la estructura de caminos en Figura 3 cumple con las restricciones antes propuestas. El problema de fondo a resolver es cómo diseñar estos túneles en forma optimizada para un conjunto de datos como el del ejemplo.

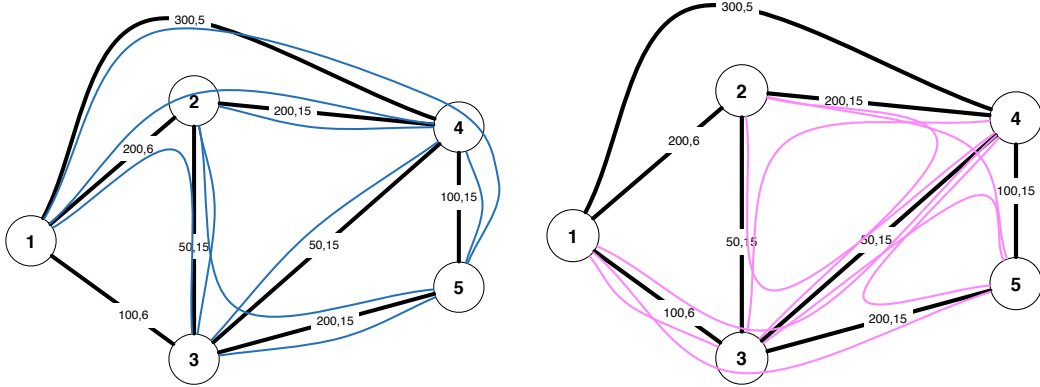


Figura 3: Ejemplo, estructura de caminos primarios [izquierda] y secundarios [derecha]

Se asume que los atributos de los enlaces (delay, capacidad) así como las matrices de demandas y límites de delays son todos simétricos; con lo cual, los caminos de ida y vuelta pueden ser los mismos. Observar que solamente hay túneles cuando hay demanda entre los nodos. El objetivo a optimizar es conseguir una estructura de caminos tal que la matriz de demanda pueda aumentar proporcionalmente en el mayor factor posible, sosteniendo las restricciones previas. En general, los datos del problema son:

- La red de datos $G = (V, E)$, donde V representa el conjunto de nodos IP/MPLS y E el conjunto de enlaces entre ellos.
- Los delays de los enlaces lógicos, i.e., $L : E \rightarrow \mathbb{R}^+$, y sus capacidades $C : E \rightarrow \mathbb{R}^+$.
- La matriz de demandas $D : V \times V \rightarrow \mathbb{R}^+$, y la de delays máximos entre nodos $MD : V \times V \rightarrow \mathbb{R}^+$. La existencia de un túnel está ligada a que $D(u, v) > 0$.

Se pide:

1. Proponga una formulación de optimización combinatoria para resolver el problema de ingeniería de tráfico active/standby en MPLS antes descrito. Como referencia para la formulación exacta del problema, incluir las siguientes variables booleanas:
 - Las que determinan qué secuencia de enlaces va a ser seguido por el camino primario o secundario de cada túnel. Sea $x_{ij}^{p,uv}$ la variable que indica si el enlace ij es usado como parte del camino primario que lleva el tráfico entre u y v . Análogamente, $x_{ij}^{s,uv}$ indica lo propio para el secundario.
 - El conjunto de variables auxiliares $y_{ij,rs}^{uv}$ que indican si el enlace ij va a ser usado como protección del tráfico entre u y v ante la falla del link rs . Esto sucede cuando ij es usado como parte del camino secundario para el túnel uv , y al mismo tiempo rs es parte del primario.

Sugerencia: Agrupe las restricciones del problema en dos partes. Por un lado, las que determinan las reglas de construcción de los caminos lógicamente independientes. En segundo lugar, las que establecen límites en el delay punta-a-punta y en las capacidades. Usar como dato que, la estructura de túneles de la Figura 3 es factible para la red de Figura 2 con los datos de Tabla 1.

2. Como herramienta de referencia usar *glpk* (<https://www.gnu.org/software/glpk/>). Con ella, resuelva en forma exacta el problema para la instancia anterior, y para aquellas cuyos datos se detallan en los archivos: *prob1.txt*, *prob2.txt* y *prob3.txt*.
3. *Opcional:* Analice la complejidad computacional del problema.
4. *Opcional:* Dependencia física entre enlaces lógicos. Suponga ahora que el enlace 1-4 de Figura 2 es físicamente dependiente de 1-2 y 2-4, i.e., una falla en 1-2 o en 2-4 hace caer también a 1-4. Resuelva nuevamente el problema de la parte 1 con este cambio.
Sugerencias: Plantee primero expresiones lógicas para el problema, del estilo “si el camino primario de un túnel usa x o y entonces el secundario no puede usar z ”, y busque expresiones algebraicas que capturen esa lógica. Usar como referencia que la estructura de Figura 3 es óptima para este problema.
5. Diseñe e implemente un algoritmo basado en alguna de las Metaheurísticas vistas en el curso, para resolver el problema de este obligatorio en forma general. Encuentre soluciones para la instancia del *prob4.txt* y estime una cota del error cometido.

6. *Opcional:* Implemente una variante del algoritmo anterior que permita resolver el problema de la parte 4 (dependencia física) para la instancia de *prob4.txt*. El problema de referencia de esta instancia es el de Figura 4. Los enlaces en punteado son físicamente dependientes de los marcados como sólidos en el mismo color.

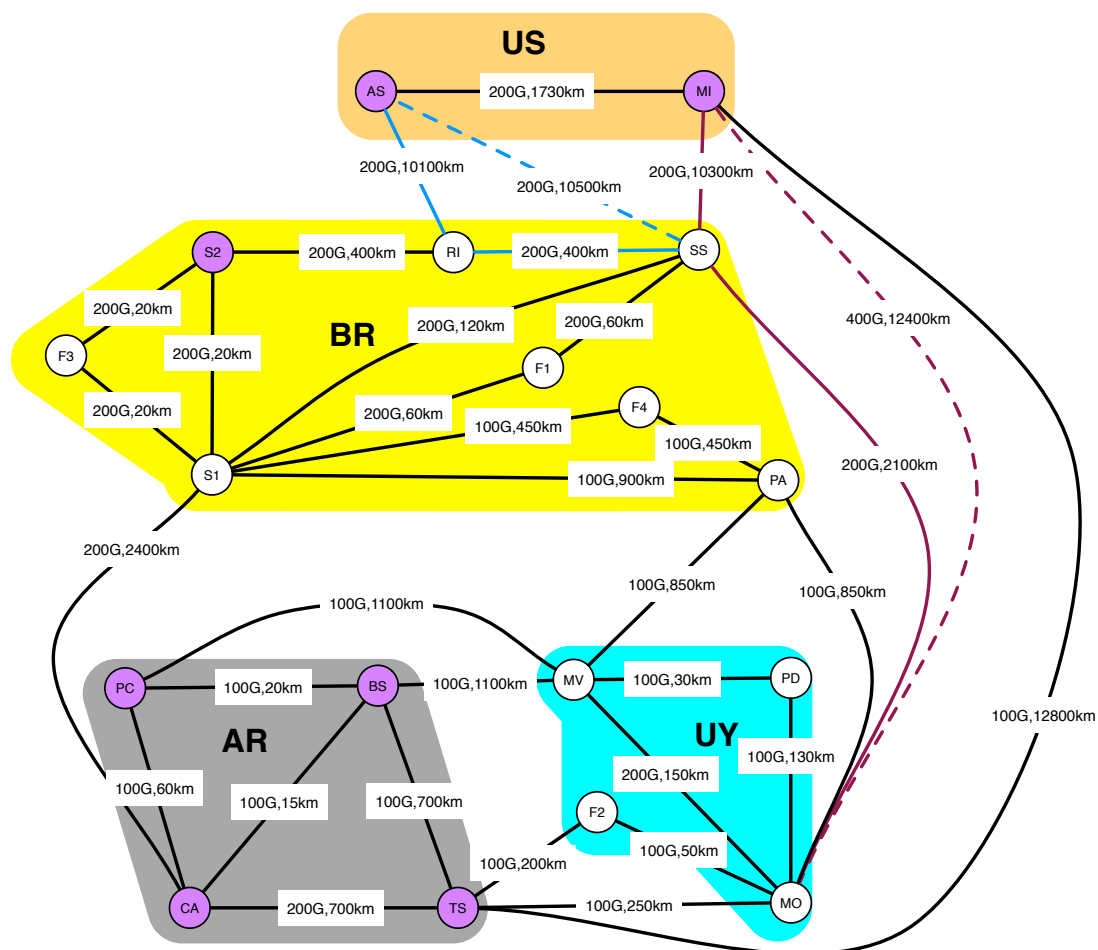


Figura 4: Red de referencia para problema de *prob4.txt*

NOTAS: Se deben resolver al menos dos de los tres opcionales. En caso de que alguna de las instancias (partes 5 o 6) no sea factible, proponga una metodología greedy para ampliar selectivamente los enlaces de la red hasta lograr la factibilidad buscada. Para la defensa final se proveerán instancias adicionales del problema.