

Universidad Técnica Federico Santa María.
Departamento de Electrónica.

IPD-438 Seminario de Redes de Computadores.
II Semestre 2002.
Profesor: Agustín González.

Informe Final
**Redes WDM de enrutamiento por
longitud de onda.**

Nombre alumno: Felipe Carrillo Oliva.
Rol: 9621013-2
Fecha: 11 de noviembre de 2002.

INTRODUCCIÓN.

Las redes de datos han experimentado un tremendo crecimiento en su demanda en los últimos años. Podemos ver esto tanto en la red mundial Internet como en las redes corporativas privadas. Esto ha estimulado el estudio de nuevas tecnologías que permitan una mayor velocidad de transmisión para satisfacer la creciente demanda. En este ámbito, destaca el desarrollo de las redes de fibra óptica, las cuáles gracias al surgimiento del sistema de multiplexión por división de longitud de onda WDM, se han hecho capaces de proveer gran ancho de banda. Al mismo tiempo, se han desarrollado conmutadores, amplificadores, multiplexores en el dominio óptico han incrementado dramáticamente la velocidad de aquellas funciones, que antes requerían de conversión óptico-electrónica.

Estos avances han permitido el surgimiento de, entre otras arquitecturas, las redes de enrutamiento por longitud de onda WDM, las cuáles son el motivo de estudio en este trabajo, en especial lo que se refiere al problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda.

RESUMEN

En este informe final, se rescatan los aspectos más importantes de las dos entregas anteriores, más una vista al problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda dinámicos.

Las redes ópticas son aquellas basadas en el uso de fibras ópticas, y cuya última generación operan en forma completamente óptica. El sistema de multiplexión por longitud de onda, WDM, es una tecnología de transmisión óptica que introduce distintos canales en distintas longitudes de onda en una fibra. Para esta tecnología, se implementan distintas arquitecturas de red, entre las cuáles están las redes de enrutamiento por longitud de onda, en las que pueden utilizarse distintos tipos de enrutadores, y soportar o no conversión de longitud de onda, que consiste en poder cambiar la longitud de onda de una señal en un nodo enrutador. Un *lightpath* es un camino óptico entre dos nodos de la red, y que cumple la función de comunicar estos nodos. El establecimiento de *lightpaths* considera el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda para los *lightpaths*, él cuál puede dividirse en dos tipos, dependiendo si la red tiene *lightpaths* estáticos o dinámicos. La resolución de este problema en el caso estático, considera para la búsqueda de una ruta algoritmos de camino más corto y selección secuencial de rutas, además de métodos de análisis combinatorio y algoritmos heurísticos. Para la asignación estática de longitud de onda, se considera también búsqueda y asignación secuencial, o alternativamente métodos de análisis combinatorio y algoritmos heurísticos. La resolución del problema para tráfico dinámico, utiliza para la búsqueda de rutas esquemas basados tanto en información de enrutamiento global de la red como en información local.

La asignación dinámica de longitud de onda se hace por medio de un protocolo de señalización que apunta a reservar recursos por medio de mensajes de control.

REDES ÓPTICAS.

Son redes de telecomunicaciones de gran capacidad basadas en tecnologías ópticas y componentes que proveen enrutamiento, manutención y restablecimiento a nivel de longitud de onda. El origen de las redes ópticas está ligado a la técnica WDM (Wavelength Division Multiplexing) que dio capacidad adicional a las fibras ópticas existentes.

De acuerdo a la tecnología física empleada, las redes pueden clasificarse en tres generaciones. La primera generación está basada en cables de cobre o tecnologías de microondas (Ethernet, satélites, etc). En la segunda, se introdujo el uso de enlaces de fibra óptica, pero está limitada a las velocidades electrónicas (unos pocos Gb/s) empleadas en switches y nodos terminales. Este fenómeno es llamado *cuellos de botella electrónicos*. Finalmente se tiene la tercera generación, diseñada de modo *all-optical* (óptica por completo) basada en WDM, y donde tanto la transmisión como el switching de datos se hace enteramente en el dominio óptico.

MULTIPLEXIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM).

Es una técnica de transmisión por fibra óptica. Consiste en multiplexar diferentes longitudes de onda en una simple fibra. Entonces el espectro óptico correspondiente a la región de bajas pérdidas en fibras ópticas monomodo (1500 nm), se divide en algún número de canales de pequeña capacidad.

WDM posee la capacidad de *transparencia*, esto debido a que no existe proceso electrónico alguno en la red. Los canales actúan como si fueran fibras independientes. Esta propiedad hace posible el soporte de varios formatos de datos y servicios en forma simultánea en la misma red. Esto permite el soporte para futuros protocolos y tasas de transmisión, así como los ya existentes.

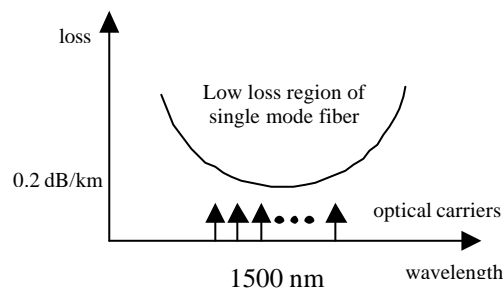


Figura 1. Multiplexión por división de longitud de onda.

REDES WDM.

Aunque la topología física de una red WDM debe ser del tipo ring, la distribución lógica de tráfico puede ser arbitraria.

1- Enlace WDM.

Dada la capacidad de transportar varios canales ópticos en una fibra, un enlace WDM cumple la función de lo que antes hacían varias fibras en paralelo, reduciendo los costos.

2- Red óptica pasiva.

Su principal característica es que la fibra se comparte entre una Oficina Central y Unidades de Red Óptica, entre las cuáles se establece una conexión bidireccional en estructura de árbol, con control centralizado y enrutamiento en la Oficina Central.

3- Redes de difusión y de selección.

Los transmisores difunden su señal a diferentes canales de longitud de onda. Los receptores pueden seleccionar la señal deseada. Generalmente se basan en topología estrella. Su principal desventaja es la poca capacidad de reutilización de longitudes de onda, por lo que resulta conveniente para redes de área local pero no mayores.

4- Redes de Enrutamiento por Longitud de Onda.

Están compuestas por uno o varios nodos selectores de longitud de onda llamados *enrutadores de longitud de onda* y por fibras que los interconectan. Cada uno de estos enrutadores tiene puertos de salida y entrada, los que se conectan a nodos terminales o bien a otros enrutadores. Toman sus decisiones de acuerdo al puerto y la longitud de onda de la señal de entrada. Un *lighpath* o *canal óptico* se define como el paso entre dos nodos de la red, y equivale a una longitud de onda en cada enlace del paso. Véase la figura 2. En el caso que dos canales cualesquiera no compartan el mismo enlace de fibra en alguna parte de la red, éstos pueden utilizar la misma longitud de onda en redes de enrutamiento por longitud de onda. Esta reutilización de la longitud de onda implica una reducción del número de longitudes de onda requerido para construir redes de área amplia. Dependiendo del diseño y componentes en uso, un enrutador de longitud de onda puede poseer distintas capacidades, como por ejemplo, enrutamiento estático o reconfigurable, proveer o no conversión de longitud de onda. Estas características tienen una influencia directa en la operación y escalabilidad de la red. Por lo tanto, las redes de enrutamiento por longitud de onda son la primera alternativa para redes de área amplia basadas en tecnología *all-optical*.

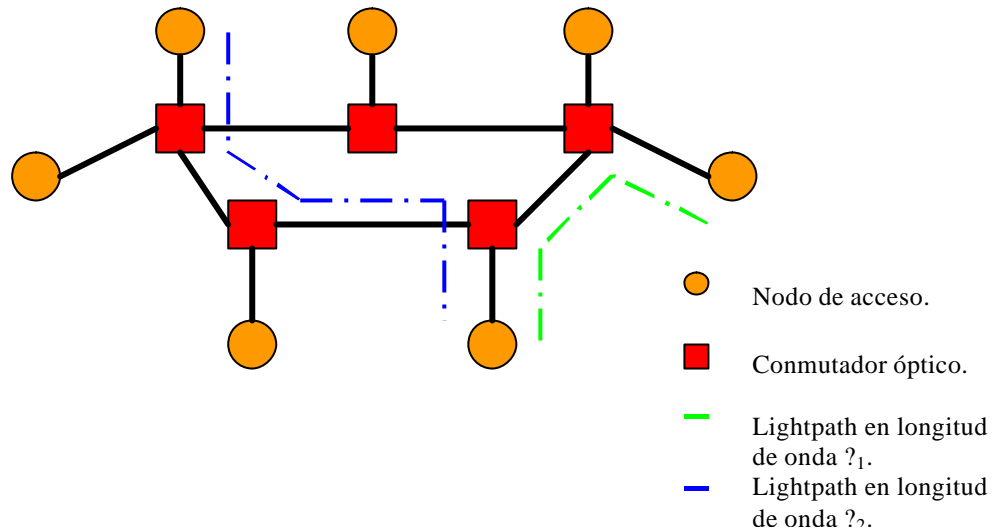


Figura 2. Una red de enrutamiento por longitud de onda.

ENRUTADORES POR LONGITUD DE ONDA.

De acuerdo a la matriz de enrutamiento, hay cuatro principales tipos: *Conectores Cruzados de Fibra*, *Multiplexores Add-Drop*, *Enrutadores por Longitud de Onda Estáticos* y *Reconfigurables*.

1- Conectores Cruzados de Fibra:

Consiste en un switch que envía la señal de entrada de un puerto a uno de salida, sin hacer distinción de longitud de onda.

2- Multiplexores Add-Drop:

Agregan o recuperan señales desde las longitudes de onda de la red. Se necesitan en los puntos terminales.

3- Enrutadores por Longitud de Onda Estáticos:

Se implementan usando una etapa de demultiplexación donde se separan las distintas longitudes de onda en los diferentes puertos de entrada, llevándose cada una de ellas a un puerto de salida fijo, que se escoge de acuerdo la longitud de onda y puerto de entrada. En el puerto de salida se multiplexan las distintas longitudes de onda y se envían por el enlace.

4- Enrutadores por Longitud de Onda Reconfigurables:

Pueden enrutar una señal de un puerto de entrada y de una longitud de onda dada a cualquier puerto de salida independientemente de otras señales en longitudes de onda distintas en los mismos puertos. Por lo tanto las señales enrutadas al mismo puerto de salida deben estar en distintas longitudes de onda.

CONVERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

En las redes de enrutamiento por longitud de onda, los lightpaths deberían ser asignados a la misma longitud de onda a lo largo de sus rutas, y aquellos que compartan uno o más enlaces de fibra a través de sus rutas deberían ser asignados a longitudes de onda diferentes. Esto se conoce como la *restricción de continuidad de longitud de onda*.

Véase la figura 3. Supóngase que se tienen disponibles dos longitudes de onda (roja y verde) para cada enlace nodo a nodo. Además, suponemos que se han establecido los lightpath señalados.

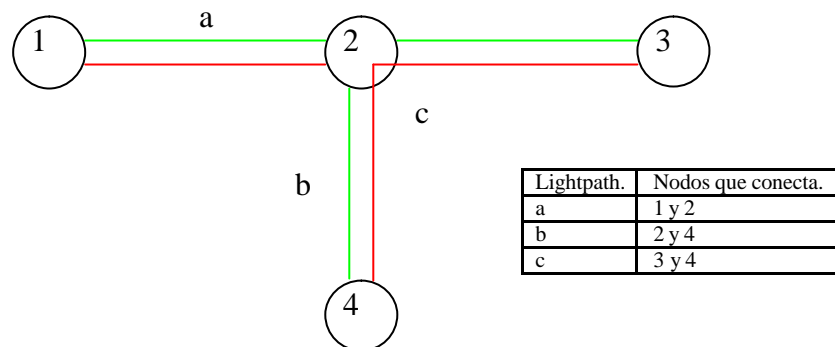


Figura 3. Restricción de continuidad de longitud de onda.

Supongamos ahora que necesitamos establecer conexión entre los nodos 1 y 3. La restricción de continuidad de longitud de onda exige que el nuevo lightpath tenga la misma longitud de onda en todos los enlaces que atraviere. Sin embargo, como puede verse, no hay una longitud de onda común disponible para conectar los nodos 1 y 3. Puede observarse también que el el lightpath *c* entre los nodos 3 y 4 cumple la restricción.

Esta restricción se puede evitar empleando *convertidores de longitud de onda* en los enrutadores. Estos dispositivos transfieren una señal desde un canal de longitud de onda a otro con longitud de onda distinta. Por tanto los lightpaths pueden ser asignados a diferentes longitudes de onda a lo largo de sus rutas.

Véase ahora la figura 4. Para el mismo caso de la figura 3, se dota de un convertor de longitud de onda al nodo 2, de modo de poder establecer entonces el lightpath *d* que conecta los nodos 1 y 3.

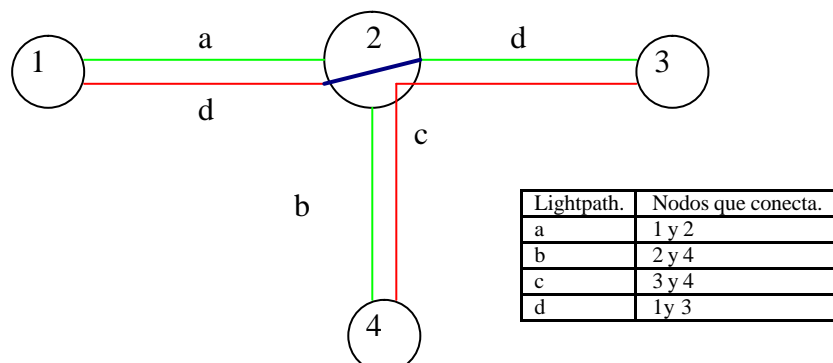


Figura 4. Conversión de longitud de onda.

Las redes con esta característica son equivalentes a las redes de circuito conmutado tradicionales. Esto significa que si se utilizan conversores de longitud de onda en los nodos enrutadores, será suficiente contar un canal (probablemente a distintas longitudes de onda) a través de la ruta para establecer un lightpath. Los conversores pueden ser de tipo óptico-electrónico y all-optical. Esto significa que mediante el uso de conversores en redes de enrutamiento por longitud de onda se puede mejorar la utilización de los recursos de fibra, resultando un mejor desempeño de la red.

ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

Encontrar rutas a través de la topología física y la asignación de longitudes de onda para los lightpaths es llamado el *problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda* (Routing and Wavelength Assignment (RWA)).

Lo ideal sería establecer lightpaths entre cada par de nodos de una red. Sin embargo, en las redes de enrutamiento WDM el número de longitudes de onda disponibles en las fibras, así como el número limitado de enlaces, restringe el número de lightpaths que se puedan establecer.

El objetivo en RWA es maximizar el throughput por asignación óptima de rutas y longitudes de onda para un patrón de tráfico dado.

Los algoritmos RWA disponibles en la literatura difieren en sus modelos de tráfico y métricas de desempeño. Los modelos de tráfico generalmente están en las categorías: 1) *tráfico estático* y 2) *tráfico dinámico*. En el primer caso, un conjunto de pares de nodos fuente-destino están dados y son fijos, mientras que en el segundo los requerimientos de conexión arriban y terminan desde la red uno por uno aleatoriamente. Las métricas de desempeño generalmente caen en alguna de las categorías: 1) *número de longitudes de onda requeridas*, 2) *probabilidad de bloqueo de conexión (o throughput)* definida como la razón entre el número de conexiones bloqueadas y el número total de conexiones que arriban o dadas, y por último 3) *número de recursos de fibra manejados en los nodos enrutadores (o costo de fibra)*.

Para los algoritmos donde se asume un patrón de tráfico estático, el objetivo es minimizar el número de longitudes de onda para establecer un cierto número de conexiones, o bien maximizar el número de conexiones para un número dado de longitudes de onda disponibles.

Por otra parte, en algoritmos donde se trabaja con tráfico dinámico, el objetivo es minimizar la probabilidad de bloqueo de conexión. Es imperativo que estos algoritmos sean simples y rápidos para que la atención de las peticiones de conexión sea tan rápida como sea posible.

ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA ESTÁTICOS.

Básicamente, el problema puede ser planteado como: dado un conjunto de lightpaths que necesitan establecerse en la red, y dada una restricción en el número de longitudes de onda, se necesita determinar las rutas y las longitudes de onda que deben asignarse a los lightpaths de modo de maximizar el número de lightpaths establecidos (o minimizar el número de longitudes de onda requeridas, o bien, alcanzar la mínima probabilidad de bloqueo de lightpath). El problema de enrutamiento se resuelve por técnicas basadas en algoritmos shortest path. La asignación de longitud de onda se determina por técnicas de coloreo de grafos para las rutas seleccionadas. Entonces el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda puede definirse como un problema de optimización de modo que usa varias funciones de costo. Por ejemplo, 1) establecer todos los lightpaths usando un número mínimo de longitudes de onda, 2) establecer todos los lightpaths usando un número mínimo de largo de paso (o distancia entre dos nodos), 3) maximizar el número de lightpaths que se establecen sujeto a las restricciones de número de longitud de onda y largo de paso.

El problema RWA puede dividirse en dos funciones: enrutamiento y asignación de longitud de onda. Más aún, ambas funciones pueden dividirse en dos componentes: 1) búsqueda y 2) selección.

ELEMENTOS FUNCIONALES DE ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO.

La función de búsqueda es realizada por técnicas de camino más corto, como los algoritmos de Dijkstra y Bellman-Ford y sus variaciones.

Shortest path: estos algoritmos buscan la ruta más corta entre un par de nodos en un grafo. La ruta más corta es la que tiene menor costo que cualquiera otra posible. La función de costo es frecuentemente la suma de los pesos de las etapas en la ruta. El algoritmo genera una ruta que es independiente de otras selecciones. Entonces no se requiere ningún orden ni regla de búsqueda.

Weight Shortest path : algoritmos iguales a los anteriores, pero el costo de enlace puede variar dinámicamente dependiendo del número de rutas establecidas. Por lo tanto se necesita cierto criterio de búsqueda. Por ejemplo:

- Mayor tráfico primero, ordena los lighpath a ser enrutados comenzando con aquél que tenga mayor tráfico con el objeto de encontrar una ruta.
- Esquema aleatorio, se ordenan los lightpaths a enrutar de forma aleatoria.

k-Shortest Path: algoritmos que buscan más de una ruta para cada par fuente-destino, proporcionando flexibilidad para la selección de ruta. Sin embargo, el problema de enrutamiento se transforma en un problema de selección, donde las rutas se eligen para obtener un costo mínimo (número de saltos o costo de enlace) para todos los pares fuente destino.

El proceso de selección puede ser llevado a cabo por algoritmos secuenciales, o bien por métodos de optimización combinatoria. El algoritmo secuencial (conocido como algoritmo Greedy) es simplemente aquél en que la selección para cada lightpath es

hecha secuencialmente. Se necesitan dos subfunciones: orden de selección y norma de selección. La primera es la secuencia en que los lightpaths son enrutados (o asignados). La norma de selección es un criterio de decisión para elegir una de las rutas candidatas.

- Orden de selección:
 - Esquemas aleatorios ordenan los lightpaths a ser enrutados aleatoriamente de forma de seleccionar rutas.
 - Esquemas fijos ordenan los lightpaths a ser enrutados en un orden dado (por ejemplo orden alfabético).
 - Esquemas “más largo primero”, ordena los lightpaths a enrutar colocando primero el que posea mayor costo o saltos.
 - Esquemas “más corto primero”, igual que anterior, pero comenzando con menor costo o saltos.
- Norma de selección:
 - Selección aleatoria de una ruta entre las candidatas.
 - Elección de la primera ruta acertada.
 - Selección de una ruta de acuerdo a regla de probabilidad.
 - Selección de ruta en un enlace que tenga el menor número de rutas establecidas.

Por otra parte, las técnicas de selección combinatoria considera la interdependencia del enrutamiento de lightpath. Estos métodos se dividen en mecanismos óptimos y heurísticos. Los óptimos ocupan todas las combinaciones posibles de la interdependencia, obteniendo el mejor resultado, pero el costo por complejidad computacional es crítico. Los métodos heurísticos (ver apéndice B) reducen el espacio de combinaciones.

- Para solución óptima, se usa un programa entero mixto. Esto es en extremo dificultoso en términos de complejidad computacional.
- Para una solución heurística, se propone un algoritmo de redondeo aleatorio. Aquí, el algoritmo de enrutamiento se ejecuta repetidamente para diferentes conjuntos de rutas mientras el máximo número de enlaces en todas las rutas se decrece a través de selección alternativa de rutas. Se repite el proceso hasta que no hayan más mejoras posibles.

ELEMENTOS FUNCIONALES DE ALGORITMOS DE ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

El problema de asignación de longitud de onda también puede dividirse funcionalmente en búsqueda y selección. La búsqueda es simplemente saber que cualquier longitud de onda disponible en la ruta elegida puede ser asignada al lightpath. El paso siguiente es la selección de la longitud de onda entre las disponibles de modo de maximizar la utilización de éstas. Similarmente al caso de enrutamiento, la selección puede ser llevada a cabo en forma secuencial o combinatoria. El modo secuencial consiste en ordenar las rutas para asignarles una longitud de onda.

- Orden de selección.
 - Mayor número de vecinos primero, se ordenan las rutas de acuerdo al número de vecinos de modo de asignarles longitud de onda disponible.

- Más longitudes de onda disponibles, ordena las rutas en orden al número de longitudes de onda disponibles.
- Mayor tráfico primero, se ordenan las rutas en orden de requerimientos de tráfico.
- Mayor número de pasos, se ordenan las rutas de acuerdo al mayor número de saltos contados para cada una.
- Más cortas primero, de acuerdo al menor número de saltos.
- Orden aleatorio.
- Norma de selección.
 - Asignación de la primera longitud de onda disponible.
 - Asignar la longitud de onda más utilizada disponible.
 - Asignar la longitud de onda menos utilizada.
 - Asignación aleatoria.

La selección combinatoria considera la interdependencia de cada selección. También se usan aproximaciones optimales o heurísticas. Las aproximaciones optimales se aplican a un problema NP, difícil de aplicar a redes muy complejas.

El problema de asignación estática de longitud de onda puede ser reducido a un problema de coloreo secuencial de grafo, el cuál se dice que es NP-completo¹. Dado un conjunto de lightpaths y sus rutas, se construye un grafo $G(V,E)$ donde cada lightpath se representa por un nodo en el grafo G . Si dos lightpaths atraviesan un enlace de fibra común, entonces se dibuja una línea no dirigida entre ambos nodos. Resolviendo el problema de dar color a los nodos de manera que dos nodos adyacentes no tengan el mismo color, se puede reducir el número de longitudes de onda a utilizar. En la figura siguiente, se muestra un ejemplo donde se puede observar la equivalencia de asignación de longitud de onda con un problema de coloreo de grafo. Supóngase que se han seleccionado las rutas a, b, c y d (figura 5a), el grafo de coloreo correspondiente a estas rutas se muestra en la figura 5b.

¹ Las clases de complejidad en ciencias computacionales, define a los problemas NP como aquellos cuya solución hasta la fecha no han podido ser resueltos de manera exacta por medio de algoritmos deterministas eficientes, pero que pueden ser resueltos por algoritmos no-deterministas.

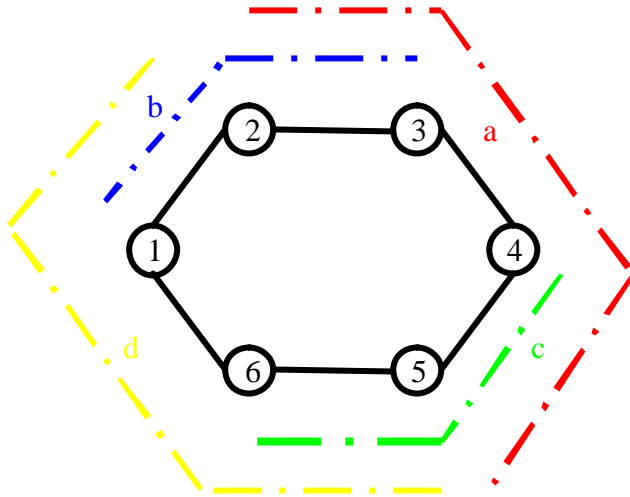


Figura 5a. Rutas establecidas entre nodos de una red.

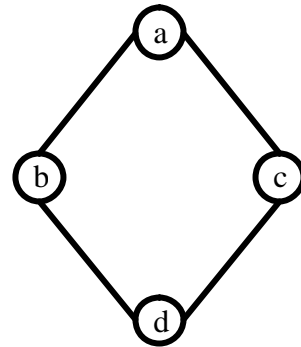


Figura 5b. Grafo de coloreo equivalente para las rutas de la figura 4a.

El número de colores necesarios para colorear el grafo G , conocido como el Número Cromático $X(G)$, es difícil de determinar debido a la naturaleza del problema (NP), si la red tiene una densidad considerable de nodos y enlaces.

Las aproximaciones heurísticas son robustas para reducir el espacio de búsqueda a un pequeño conjunto de lightpaths, sin embargo ello puede incrementar el número de longitudes de onda. Los algoritmos heurísticos propuestos están basados en métodos de coloreo de grafos.

- Selecciones óptimas se resuelven por búsquedas exhaustivas. Estos algoritmos generan el mejor resultado de coloreo para un grafo dado, pero no pueden asegurar un manejo de grafos complejos.

Los algoritmos de selección heurística trabajan bien con problemas de coloreo de grafos. Pueden ser clasificados en:

- *Algoritmos genéticos*: son técnicas estándar para problemas de optimización combinatoria complejos. Véase el apéndice B.1.
- *Algoritmos de recocido estimulado*: son otra técnica estándar para problemas complejos de optimización combinatoria. Ver apéndice B.2.
- *Algoritmos TABÚ*, son métodos heurísticos relativamente nuevos. La idea básica es una búsqueda aleatoria local, pero algunos movimientos son prohibidos.

En el apéndice A, se puede ver un ejemplo de análisis combinatorio para este problema. Trata de la formulación de un programa lineal entero.

ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA DINÁMICOS.

Cuando se establecen y liberan lightpaths, se deben tomar decisiones de enrutamiento y asignación de longitud de onda tanto como arriban las peticiones de conexión en la red. Es posible que, para una petición de conexión, no haya suficientes recursos en la red como para iniciar un lightpath, en cuyo caso la petición se bloquea. Esto puede suceder también si no hay una longitud de onda común disponible en todos los enlaces de la ruta elegida. Entonces, el objetivo en el caso de tráfico dinámico es la elección de una ruta y una longitud de onda que maximicen la probabilidad de poder establecer una conexión dada, mientras que al mismo tiempo apunte a minimizar el bloqueo de futuras peticiones de conexión. Similarmente al caso de lightpaths estáticos, el enrutamiento y asignación de longitud de onda dinámicos se descompone en los subproblemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda.

Los métodos para resolver el problema de enrutamiento pueden clasificarse tanto como estáticos o adaptables, y pueden utilizar información del estado de la red global o local.

ENRUTAMIENTO FIJO Y ENRUTAMIENTO DE PASOS FIJOS-ALTERNATIVOS.

Representan dos ejemplos de algoritmos que utilizan rutas estáticas. En enrutamiento fijo, una ruta simple es predeterminada para cada par fuente-destino. En enrutamiento de pasos fijos-alternativos, múltiples rutas fijas son calculadas previamente para cada par fuente-destino y guardadas en una lista ordenada en la tabla de enrutamiento del nodo fuente. Cuando arriba una petición de conexión, una ruta se selecciona desde el conjunto de rutas calculadas previamente.

Estos métodos tienen la ventaja de ser más simples de implementar que los esquemas de enrutamiento adaptables, pero adolecen de un alto bloqueo de conexión.

ENRUTAMIENTO ADAPTABLE BASADO EN INFORMACIÓN GLOBAL.

Los métodos adaptables de enrutamiento incrementan la probabilidad de establecer una conexión tomando en cuenta la información sobre el estado de la red. Para el caso donde está disponible la información global, las decisiones de enrutamiento se pueden hacer con información completa sobre las longitudes de onda disponibles en cada enlace. De modo de encontrar una ruta óptima, se puede asignar un costo a cada enlace, basado en la disponibilidad de longitudes de onda, y se ejecuta un algoritmo de ruta de menor costo.

El enrutamiento adaptable basado en información global, puede implementarse de manera centralizada o distribuida. En un algoritmo centralizado, una entidad simple, como un administrador de red, mantiene información completa sobre el estado de la red, y es su responsabilidad encontrar rutas y levantar lightpaths para las peticiones de conexión. Mientras una entidad centralizada maneje completamente la red, no se necesita una gran coordinación entre los nodos. Sin embargo, si esta entidad central falla, afectará a todo el sistema.

Un *algoritmo de enrutamiento adaptable distribuido basado en información global* puede implementarse en varias formas. En un método de estado de enlace, cada nodo en

la red mantiene la información completa sobre el estado de la red. Cada nodo puede por tanto encontrar una ruta para una petición de conexión de forma distribuida. Pero dado que el estado de la red cambia, todos los nodos deben ser informados. Por lo tanto, el establecimiento o remoción de un lightpath en la red puede resultar en un broadcast de mensajes de actualización. Esta necesidad puede resultar en significativos costos de control, especialmente si los lightpaths tienen una alta tasa de establecimiento. Aún más, es posible que uno o más nodos tengan información obsoleta, lo que lleva a decisiones de enrutamiento incorrectas.

Es posible también un enrutamiento por medio de vector distancia o *enrutamiento distribuido aproximado*. Aquí no se requiere que cada nodo mantenga toda la información sobre el estado de los enlaces. En lugar de eso, cada nodo maneja una tabla de enrutamiento que indica, para cada destino y cada longitud de onda, el siguiente salto hacia el destino y la distancia hacia él. La aproximación está basada en un algoritmo distribuido Bellman-Ford para mantener las tablas de enrutamiento. En este caso los nodos también necesitan actualizar la información de su tabla de enrutamiento cada vez que una conexión es establecida o terminada. Para ello, cada nodo envía a sus vecinos información de enrutamiento, periódicamente o cuando el estado de los enlaces del nodo cambien.

Otra forma de enrutamiento adaptable es el enrutamiento por *pasos de menos congestión* (LCP). Se entiende por “paso” como un posible lightpath. La congestión en un enlace se mide de acuerdo al número de longitudes de onda disponibles en él. Los enlaces que tengan menos longitudes de onda disponibles se consideran más congestionados. La congestión en un paso se indica por su enlace mas congestionado. Al igual que en *enrutamiento alternativo*, para cada par fuente-destino se preselecciona una secuencia de rutas. En el momento que llega una petición de conexión, se elige el paso menos con menor congestión.

Aún cuando los esquemas de enrutamiento basados en información global deben planificar tareas de mantener potencialmente gran cantidad de información de estado que cambia constantemente, estos esquemas frecuentemente toman las decisiones de enrutamiento más óptimas si el estado de la información está actualizado. De esta forma, los esquemas basados en conocimiento global son más convenientes en redes donde los lightpaths son medianamente estáticos, y que no cambien mucho con el tiempo.

ENRUTAMIENTO ADAPTABLE BASADO EN INFORMACIÓN DE NODOS VECINOS.

En la aproximación LCP, todos los enlaces en todos los pasos candidatos deben examinarse de modo de elegir el paso menos congestionado. En cada nodo se requiere mantener toda la información de estado, y ésta debe ser recopilada en tiempo real cuando el lightpath se establece. Una variación de este sistema, consiste en examinar los primeros k enlaces en cada paso, referida como la información de los vecinos del nodo fuente, y donde k es un parámetro del algoritmo. Se ha demostrado que cuando $k = 2$, este algoritmo puede alcanzar un rendimiento similar al enrutamiento alternado-fijo.

ENRUTAMIENTO ADAPTIVO BASADO EN INFORMACIÓN LOCAL: ENRUTAMIENTO DE DESVIACIÓN.

Este esquema de enrutamiento escoge entre enlaces alternativos sobre la base salto a salto más que rutas alternativas de extremo a extremo. El enrutamiento se implementa manteniendo en cada nodo una tabla de enrutamiento que señala, para cada destino, una o más alternativas de enlace de salida para alcanzar ese destino. Esos enlaces de alternativa son computados previamente y se pueden ordenar tal que una petición de conexión elija ciertos enlaces siempre y cuando hayan recursos de longitud de onda disponibles en esos enlaces. Si los recursos no están disponibles en el enlace preferido, se escoge un enlace alternativo. Más que una tabla de enrutamiento estática, cada nodo sólo mantendrá información respecto al estado de longitudes de onda utilizadas en sus propios enlaces de salida. Por lo tanto, no existen mensajes de actualización en la red, y el ancho de banda destinado para control se reduce mucho.

ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA.

Señalización y Reserva de Recursos.

De manera de levantar un lightpath, se requiere de un protocolo de señalización para intercambiar información de control entre los nodos, y reservar recursos a través del paso. En muchos casos, el protocolo de señalización está integrado estrechamente con los protocolos de enrutamiento y asignación de longitud de onda. Los protocolos de señalización y reservación se pueden categorizar basándose en si los recursos se reservan en cada enlace en paralelo, o salto por salto hacia delante a lo largo del paso, o salto por salto hacia atrás. Los protocolos también pueden diferir dependiendo si se dispone de información global.

a) Reservación paralela

El esquema de control reserva longitudes de onda paralelamente en múltiples enlaces. El esquema, que está basado en enrutamiento de estado de enlace, asume que cada nodo mantiene información global de la topología y del estado actual de la red, incluyendo información referente a las longitudes de onda usadas en cada enlace. Basándose en esta información global, un nodo puede calcular una ruta óptima hacia el destino para una longitud de onda dada. El nodo fuente entonces apunta a reservar la longitud de onda escogida en cada enlace de la ruta, enviando separadamente mensajes de control a cada nodo en la ruta. Cada nodo que recibe una petición de reserva intentará reservar la longitud de onda específica, y enviará un mensaje de reconocimiento, positivo o negativo, al nodo fuente. Si éste recibe reconocimiento positivo desde todos los nodos en la ruta, podrá establecer el lightpath y comienza a comunicarse con el nodo destino. La ventaja de este tipo de reserva, es que acorta el tiempo de establecimiento del lightpath al tener nodos procesando peticiones de reserva paralelamente. Sin embargo, presenta el ripio de requerir conocimiento global, dado que el paso y la longitud de onda deben conocerse anticipadamente.

b) **Reservación salto por salto.**

La diferencia al caso anterior, es que la reserva se hace, enviando un mensaje de control a través de la ruta, un salto a la vez. En cada nodo intermedio, el mensaje de control se procesa antes de continuar con el nodo siguiente. Cuando el mensaje de control alcanza destino, se procesa y se envía de vuelta hacia el nodo fuente. La reservación actual de recursos de enlace puede llevarse a cabo mientras el mensaje de control está viajando en dirección hacia adelante (fuente-destino), o en reversa (cuando el mensaje retorna al nodo fuente).

Reserva hacia adelante: en este esquema, los recursos son reservados a través del paso avanzando hacia el destino salto por salto. El método de reserva depende si hay o no información global en el nodo fuente. Si éste tiene información completa de estado, sabrá qué longitudes de onda están disponibles en cada enlace. Asumiendo que la información está actualizada, el nodo fuente puede entonces enviar un mensaje de establecimiento de conexión a través del paso hacia delante, reservando la misma longitud de onda disponible en cada enlace en el paso.

Para el caso en que un nodo sólo conoce el estado de sus enlaces inmediatos, el nodo fuente puede utilizar una reservación conservadora, eligiendo una longitud de onda y enviar un mensaje de control al siguiente nodo de modo de reservar esta longitud de onda a través del paso completo, sin embargo no hay garantía alguna de que esta longitud de onda esté disponible a través de todo el paso. Si la longitud de onda es bloqueada, el nodo fuente puede elegir una longitud de onda diferente y volver a intentar. La limitación de este método es que puede acarrear mucho tiempo en establecer una conexión, porque puede necesitar de varios intentos antes de que el lightpath se levante. Una alternativa que apunta a maximizar la probabilidad de establecer un lightpath en un esquema de reservación hacia delante, es usar una reservación “agresiva” que sobre-reserve recursos. Cuando un mensaje de reservación llega a un nodo, el nodo reserva todas las longitudes de onda disponibles en todos los enlaces atravesados hasta el momento. Cuando el mensaje de reservación alcanza el nodo destino, éste elige una de entre las longitudes de onda reservadas a través de todo el paso, liberando las reservaciones de las restantes.

El inconveniente de este último esquema es, dado que los recursos de la red son sobre-reservados por un período corto de tiempo, puede llevar al bloqueo de peticiones de conexión subsecuentes, y baja utilización de la red.

Reservación hacia atrás: para prevenir sobre-reservación de todos los recursos conjuntamente, éstas pueden realizarse después que el mensaje de control haya alcanzado el nodo destino, y sea enviado de vuelta al nodo fuente. En reservación hacia atrás, el nodo fuente envía paquetes de control hacia el destino sin reservar ningún recurso. Esos paquetes de control, recopilarán acerca del uso de longitud de onda a lo largo de uno o más pasos, y el destino ocupará esta información para decidir sobre una ruta y una longitud de onda. El destino entonces envía un mensaje de reservación a los

nodos en la ruta elegida, el cual reservará los recursos de red apropiados a través de la ruta. Un posible inconveniente de este enrutamiento, es que si múltiples conexiones intentan establecerse simultáneamente, es posible que una longitud de onda disponible en un enlace en dirección hacia delante, pueda ser tomada por otra petición de conexión, y no esté disponible cuando el mensaje de reservación atraviese el enlace en dirección reversa.

CONCLUSIONES

Se ha visto el resultado de estudio de un semestre académico.

El trabajo se ha enfocado hacia uno de los aspectos más actuales de redes de comunicaciones, la tecnología WDM. Sin embargo, el estudio está más específicamente centrado en el área de redes, dejando de lado los fundamentos físicos y matemáticos de esta tecnología por estar fuera del ámbito del seminario de redes de computadoras.

Las redes WDM, más específicamente, las redes de enrutamiento por longitud de onda, ofrecen una excelente alternativa de implementación para redes de área amplia, que requieren alta velocidad de transmisión. En este sentido, se observa con mayor atención el caso de lightpaths estáticos, pues por lo general las redes de área amplia no tienen grandes fluctuaciones en sus requerimientos, teniendo en cuenta además el gran ancho de banda que puede proporcionar WDM. Quizá por el momento, no sea necesaria para redes de área local, que aún satisfacen sus requerimientos con cables de cobre.

La conversión de longitud de onda es un recurso interesante, en términos de poder hacer mejor uso de los recursos de la red, sin embargo es un recurso costoso, y puede simplemente en muchos casos no necesitarse, o bien, sólo en unos pocos enrutadores, considerando que las redes de área amplia no tienen una gran densidad de nodos y enlaces.

No se trató ningún método de enrutamiento y asignación de longitud de onda en particular, tampoco hubo una orientación a comparar el desempeño de distintos esquemas. Más bien sólo se describieron distintas metodologías en forma genérica, tanto para el caso dinámico como estático. Un estudio con más profundidad de este tópico, requiere de una investigación más especializada.

Como conclusión final, se puede decir con certeza que los aspectos básicos de una red de enrutamiento por longitud de onda fueron tratados en este trabajo.

REFERENCIAS

- **All Optical Networking.**
 - Semih Bilgen, Altan Koçyigit, September 2001.
- **Optical Networking And Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM).**
 - Muralikrishna Gandluru
 - <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/cis788-99/dwdm/index.html>
- **A Functional Classification of Routing and Wavelength Assignment Schemes in DWDM networks:**
 - Static Case. Jin Seek Choi, Nada Golmic, Francois Lapayrere, Frederic Monvcaux and David Sue.
 - Advanced Network Technologies Division, Information Technology Laboratory, Nacional Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
- **Dynamic Lightpath Establishment in WaveLength-Routed Networks.**
 - Hui Zang, Jason P. Jue, Lexman Sahasrabuddhe, Ramu Ramamurthy, Biswanath Mukherjee.
 - IEEE Communications Magazine, September 2001.

APENDICE A: Un ejemplo de formulación de Programa Lineal Entero para el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda estáticos.

Dependiendo si los nodos enrutadores poseen o no conversión, podemos clasificar los lightpath como *wavelength path* (WP) para el caso sin conversión, y *virtual wavelength path* (VWP) para el caso con conversión. En ambos tipos de enrutamiento, se asigna a los lightpath una ruta y longitud(es) de onda. Además deben satisfacerse ciertas restricciones. En el caso de VWP el número de lightpaths pasando a través de un enlace de fibra debe ser menor que la capacidad del enlace. Para WP se agrega la restricción de continuidad de longitud de onda, que limita los lightpaths que son asignados a una misma longitud de onda al número de fibras del enlace. En una topología física fija entonces, puede que no sea posible enlutar todos los lightpaths. Por lo tanto, el problema se formula como una programación lineal entera que maximice el número de lightpaths acomodados en la red.

Se consideran dos formulaciones para ambos casos, WP y VWP. Una *formulación de ruta* enumera todas las rutas entre pares fuente-destino, y se determina cuántas veces se usa cada ruta. Para *formulaciones de flujo*, la variable de decisión básica son los flujos en los enlaces generados a través de cada par de nodos terminales.

La topología física de la red se modela como un grafo unidireccional $G = (V, E)$, donde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ es el conjunto de n nodos enrutadores y terminales y $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ es el conjunto de m enlaces de fibra. En este grafo cada enlace puede contener una o más fibras, por tanto, un vector de capacidad $K = [k_j]$ se define para representar la capacidad de los enlaces. k_j es el número de fibras en el enlace j multiplicado por el número de canales de longitud de onda en cada fibra. Para facilitar la formulación, el conjunto de pares fuente-destino $S = \{v_i v_j \mid 1 = i < j = n\}$ con tamaño s se usa para representar los pares de nodos terminales. Luego, las peticiones de lightpath pueden ser representadas por un vector de demanda $D = [d_i]_{1 \times s}$ donde d_i es el número de lightpaths que se establecen entre el par fuente-destino i .

En formulaciones de ruta, todas las posibles rutas cíclicas libres entre los pares fuente-destino se determinan y el conjunto $R = \{r_1, r_2, \dots, r_r\}$ se forma por esas rutas. En correspondencia con el conjunto R , la matriz Q de incidencia ruta con par fuente-destino y la matriz de incidencia ruta con enlace de fibra, se formulan como:

$$Q = [q_{ij}]_{r \times s} \quad q_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta incide con el par fuente-destino } i \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

$$B = [b_{ij}]_{r \times m} \quad b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la etapa } e_j \text{ se usa en la ruta } i \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

En enrutamiento VWP usando formulación de ruta, las variables ILP (integer linear programming) se pueden representar por el vector de enrutamiento $F = [f_i]_{1 \times r}$, donde f_i es el número de veces que se usa una ruta. Por lo tanto, la formulación para VWP que maximiza el tráfico transportado se da como:

$$\max \sum_{i=1}^r f_i$$

sujeto a:

(la demanda es parcialmente o completamente satisfecha)

$$F \cdot Q \leq D$$

(número de lightpath que comparten un enlace está limitado a la capacidad de éste)

$$F \cdot B \leq K^T$$

En enrutamiento WP usando formulación de ruta, las variables ILP se pueden representar por una matriz de ruta-longitud de onda $W = [w_{ij}]_{r \times \lambda}$, donde w_{ij} es el número de pasos usados en la ruta r_i y longitud de onda j , y λ es el número de canales de longitud de onda en cada fibra. Por tanto, la formulación de ruta para WP que maximiza el tráfico transportado puede ser:

$$\max \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{\lambda} w_{ij}$$

sujeto a:

(la demanda es parcialmente o completamente satisfecha)

$$1_I \cdot W^T \cdot Q \leq D$$

(el número de lightpaths que usan la misma longitud de onda y comparten el mismo enlace se limita al número de fibras del enlace)

$$W \cdot B \leq \frac{1}{I} 1_I^T K$$

donde 1_I es un vector $1 \times \lambda$ en que todos los elementos son 1.

En formulaciones de flujo, las variables de decisión básicas son los flujos en los enlaces de fibra generados por cada par fuente-destino. Las variables en VWP se representan por la matriz de enrutamiento $X = [x_{jk}]_{m \times s}$, con x_{jk} igual a la cantidad de tráfico fluyendo del par fuente-destino k a través del enlace j . La formulación de flujo para enrutamiento VWP que maximiza el tráfico transportado puede ser como:

$$\max \sum_{j=1}^s p_j$$

sujeto a:

(la demanda es parcialmente o completamente satisfecha)

$$P \leq D$$

(para cada par fuente-destino el número de lightpath enrutados y la conservación del flujo deben ser válidos en cada vértice)

$$\sum_{a_j \in \mathbf{a}(n_i)} x_{jk} - \sum_{a_j \in \mathbf{b}(n_i)} x_{jk} = \begin{cases} p_k & \text{si } n_i = \text{fuente del par fuente-destino } k \\ -p_k & \text{si } n_i = \text{destino del par fuente-destino } k \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

(el flujo total en cada etapa no excede la capacidad física)

$$\sum_{k=1}^s x_{jk} \leq k_j$$

donde $P = [p_{ij}]_{1 \times s}$ representa el tráfico enrutado donde p_j es el número de lightpaths enrutados entre el par fuente-destino j ; $a(i)$ y $B(i)$ representan al conjunto de enlaces que tienen a i como origen y destino respectivamente.

Las variables en WP usando formulación de flujo son representadas por la matriz ruta-longitud de onda, $Y = [y_{ijk}]_{? \times m \times s}$, siendo y_{ijk} igual a la cantidad de tráfico que fluye entre el par fuente-destino k a través del enlace j y en la longitud de onda i . Luego, la formulación para enrutamiento WP que maximiza el tráfico puede darse:

$$\max \sum_{z=1}^Z \sum_{j=1}^S t_{zk}$$

sujeto a:

(la demanda es parcialmente o completamente satisfecha)

$$\sum_{z=1}^I t_{zk} \leq d_j$$

(para cada par fuente-destino el número de lightpath enrutados y la conservación del flujo deben ser válidos en cada vértice)

$$\sum_{a_j \in a(u_i)} y_{zjk} - \sum_{a_j \in b(u_i)} y_{zjk} = \begin{cases} t_{zk} & \text{si } i = \text{fuente del par fuente-destino } k \\ -t_{zk} & \text{si } i = \text{destino del par fuente-destino } k \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

(restricciones de capacidad)

$$\sum_{k=1}^S y_{zjk} \leq \frac{k_j}{I}$$

donde $T = [t_{zk}]$ representa el tráfico enrutado y t_{zk} es el número de lightpaths enrutados entre el par fuente-destino j y en la longitud de onda z .

El objetivo de todas las formulaciones anteriores es la maximización del número de lightpath que se requiere acomodar en una topología física dada. Otras formulaciones pueden apuntar a minimizar el número de canales de longitud de onda requeridos en cada fibra (en efecto, el número total de longitudes de onda).

La tabla siguiente compara los tamaños de los problemas formulados. Puede verse que el tamaño del problema VWP es independiente del número de longitudes de onda, mientras que el caso de WP crece cuadráticamente con el número de longitudes de onda. Por otra parte el número de variables es proporcional al número de rutas en formulaciones de ruta. Entonces, el número de variables crece exponencialmente con el tamaño de la red para redes con muchas conexiones. Aunque el número de variables es mucho menor en formulaciones de flujo, el número de restricciones sube exponencialmente con el tamaño de la red.

	Formulaciones de ruta.		Formulaciones de flujo.	
	VWP-routing	WP-routing	VWP-routing	WP-routing
Número de Variables	r	$rx\lambda$	mxs	$mxs\lambda$
Número de Restricciones	$m+s$	$mx\lambda+s$	$m+nx\lambda+s$	$mx\lambda+nx\lambda+2s$

APÉNDICE B: Algoritmos heurísticos.

Un *algoritmo heurístico* es un procedimiento de búsqueda de soluciones casi optimales a un coste computacional razonable, sin ser capaz de garantizar la optimalidad o factibilidad de las soluciones empleadas ni determinar a que distancia de la solución óptima nos encontramos (Reeves, 1995)

B.1 Algoritmos genéticos.

Los *Algoritmos Genéticos (AG)* son procedimientos de búsqueda de soluciones basados en el principio de evolución natural (Darwin y Wallace).

Principio de evolución natural: los individuos mejor adaptados al medio tienen mayores probabilidades de sobrevivir y reproducirse, transmitiendo su información genética a sus sucesores.

Al cabo de muchas generaciones, la población estará integrada por individuos bien adaptados al medio y con características genéticas similares.

Tres observaciones:

- La evolución se manifiesta sobre una población, no sobre un individuo.
- La selección actúa sobre cada uno de los individuos
- La información se transmite genéticamente codificada.

La idea de los AG consiste en aplicar estas ideas sobre conjuntos de soluciones de un problema matemático, logrando nuevas y mejores soluciones.

Dado el problema combinatorio:

$$\begin{array}{ll} \max & f(x) \\ \text{s.a.} & x \in S \subset Z^n \end{array}$$

Podemos hacer la correspondencia:

$$\begin{array}{ll} \text{Población} & \Leftrightarrow \text{Conjunto de soluciones} \\ \text{Adaptación} & \Leftrightarrow \text{Valor de la función objetivo} \end{array}$$

Obsérvese que, a diferencia de los métodos de descenso por gradiente, búsqueda aleatoria y recocido simulado, los AG actúan sobre *conjuntos de soluciones* que van mejorando iteración a iteración y no sobre una sola solución.

En lo que sigue, sin pérdida de generalidad, supondremos que queremos resolver el problema de una sola variable:

$$\begin{array}{ll} \max & f(x) \\ \text{s.a.} & x \in S \subset Z \end{array}$$

Los AG son procedimientos *iterativos* que emplean cuatro ideas fundamentales:

- a) Codificación binaria
- b) Selección
- c) Cruce
- d) Mutación

La selección es el mecanismo por el cual soluciones más próximas al óptimo (*individuos mejor adaptados*) tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos (*seleccionados*) para reproducirse.

Supongamos que, en una determinada iteración del algoritmo, tenemos un conjunto de soluciones, que denominaremos *población*:

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}, x_i \in \{0, 1\}^n$$

y que cada una de ellas (que denominamos *individuos*) tiene un valor de la función objetivo

$$f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_r)$$

La selección supone que cuanto mayor sea $f(x_i)$, mayor sea la probabilidad p_i de que x_i sea elegido y se reproduzca.

Una manera sencilla de hacer esto es tomar:

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^r f(x_j)}$$

Después asignamos realizamos extracciones aleatorias de la distribución de probabilidad obtenida.

El cruce consiste en el intercambio de una sección cualquiera de las cadenas binarias de dos individuos al azar de la población seleccionada.

El cruce sigue los siguientes pasos:

primero: elegir un punto de corte, al azar, de ambas cadenas:

▪ ejemplo:

110 | 000

011 | 011

segundo: intercambiar las secciones entre ambas cadenas, generando una nueva solución (individuo *hijo*) con la parte inicial del primer individuo (*madre*) y la parte final del segundo (*padre*):

ejemplo:

110 | 000 (madre)

\Rightarrow 110 | 011

011 | 011 (padre)

La *mutación* consiste en cambiar, con una probabilidad muy pequeña, cualquier elemento de una cadena, pasando de cero a uno o viceversa.

ejemplo:

110000 (antes de la mutación)

111000 (después de la mutación)

La mutación permite generar nuevas soluciones en poblaciones estancadas que generarían individuos idénticos a los padres.

Por ejemplo, la población:

$x_1 = 110001$

$x_2 = 110001$

$x_3 = 110001$

generaría siempre los mismos hijos.

Esquema de un Algoritmo Genético

- paso 1: $t=0$; generar una población aleatoria $P=\{x_1, \dots, x_n\}$
- paso 2: calcular $f(x_1), \dots, f(x_n)$

- paso 3: $t=t+1$; aplicar los procedimientos de
 - selección
 - cruce
 - mutación
 generando una nueva población $P'=\{x'_1,...,x'_n\}$
- paso 4: reemplazar P por P'
- paso 5: si no se cumple un criterio de optimalidad ir al paso 2

B.2 Algoritmo de recocido estimulado.

En física de la materia condensada, el *recocido* es el proceso físico consistente en calentar un sólido hasta que se funde, seguido de un enfriamiento lento hasta que el sólido cristaliza en un estado con una estructura molecular perfecta. Durante este proceso, se minimiza la energía libre del sistema.

El *recocido simulado* es un procedimiento heurístico que toma estas ideas y las aplica en la solución de problemas de optimización.

La idea básica consiste en establecer un paralelismo entre la *función objetivo* a minimizar y la *energía libre* de un sistema, así como entre *soluciones* del problema y los *estados* de dicho sistema.

Los *algoritmos de recocido simulado* emplean la formalización propuesta por Metropolis *et al.* (1953) para describir la evolución de un sólido sometido a un baño de calor hasta alcanzar el equilibrio termal.

El *criterio de Metropolis* determina la probabilidad de que un sólido sometido a un proceso de recocido que se encuentre en un determinado estado pase a un nuevo estado con distinta energía.

Supongamos que un sistema se encuentra en un estado i , con una energía libre E_i , y supongamos que generamos un nuevo estado j con energía E_j .

Si la diferencia de energía $E_j - E_i$ es menor o igual que cero, el estado j se acepta como nuevo estado con probabilidad uno. Si la diferencia de energía es mayor que cero, dicho estado se acepta probabilidad:

$$\exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right)$$

donde T representa la temperatura del baño de calor y k_B es una constante física (la *constante de Boltzmann*).

El algoritmo de recocido simulado no es más que un procedimiento de generación de soluciones seguido de la aplicación del criterio de Metropolis de manera repetitiva:

- paso 1: $t=0$; generar un estado aleatorio i
- paso 2: $t=t+1$; generar un estado j en una vecindad de i
- paso 3:
 - si $E_j < E_i$ **P** $i=j$
 - si $E_j \geq E_i$ **P** $i=j$
 - con probabilidad $\exp(-(E_j - E_i)/c(t))$
- paso 4: si no se cumple un criterio de optimalidad ir al paso 2.