

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE REDES ÓPTICAS TRONCALES

Ingeniería de Telecomunicación

Noemi Gutiérrez Aller
Mayo 2010

ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE REDES ÓPTICAS TRONCALES

Autor: Noemi Gutiérrez Aller
Tutor: Óscar González de Dios
Ponente: Javier Aracil Rico

Dpto. Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Mayo 2010

Resumen

El rápido crecimiento en el tráfico de la red Internet en los últimos años se ha visto favorecido gracias al uso de la fibra óptica como medio de transporte debido a su gran capacidad y velocidad de transmisión. Desde hace ya varios años los tramos de enlace de fibra óptica entre los equipos que forman las redes troncales se encuentran potenciados con la utilización de sistemas DWDM, como alternativa más económica al despliegue de nuevos cables de fibra óptica. En este contexto resulta especialmente importante el estudio de los algoritmos para el diseño y planificación de una red fotónica con el objetivo de minimizar los costes de red.

En este proyecto se describen por separado dos técnicas para proporcionar el diseño de la red. La primera de ellas permite planificar la red teniendo en cuenta que los circuitos se restauran en caso de fallo al mismo tiempo que se garantiza la supervivencia ante fallo simple y fallo doble. La otra técnica considera las limitaciones que introducen los propios parámetros de la fibra óptica los cuales impiden tener un nivel adecuado de señal en el receptor.

Palabras Clave

ILP, lightpath, CPLEX, limitaciones físicas, fallo doble, fibra óptica, ruta de trabajo y de supervivencia, RWA, PLIA.

Abstract

In the last years, the fast growth of the Internet traffic has been possible thanks to the usage of the fiber optics as a way of transport due to its large capacity and high transmission bit rates. For some years fiber optic links between backbone network equipments are potentiated with the utilization of DWDM systems, as the most economical alternative to the deployment of new fiber optic cables. In this context is especially important the study of the algorithms for the design and planning of a photonic network with the objective of minimizing the network costs.

This project will describe separately two techniques to provide the network design. The first one allows a network planning given that circuits are restored in case of failure while guaranteeing survival against simple and double failures. The other technique considers the constraints introduced by the own parameters of the fiber optics which prevented to have an adequate signal level at the receiver.

Agradecimientos

En primer lugar quería dar las gracias a mis jefes en TID, Rafael Cantó y Juan Fernández-Palacios, por haberme dado la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo durante estos meses y con ello poder llevar a cabo este proyecto. También gracias a Óscar González, por haber sido tan buen tutor, por sus revisiones y sus enseñanzas sobre ILP's, y a Javier Jiménez por todos los conocimientos que me ha proporcionado, en especial sobre proyectos europeos.

Por parte de la universidad, gracias a Javier Aracil y Víctor López por toda su ayuda prestada.

Son muchas las personas que me vienen a la mente repasando estos años de carrera: mis compañeros de universidad (Roger, Sara, David, Pilar, Dana, Lucía, Eugenio, Antonio, Jose, Muñecas, Héctor, Viti)...por compartir sufrimiento y alegría; mis niñas de Pinar de Puenteviejo (Sari, Martita, Cori y Cris)...por preocuparse y animarme; y en esta última fase, a toda la gente de TID: los de la pradera de la tercera (Javi Ramón, Fernando, Pablo, Maria José, Gerardo, Santi, LuisMa, Juanillo, JuanRa, Gurrú, Marian, Sidnei, Suso, Rafa, Mercedes, Ana, etc.), y los de plantas inferiores (el grupo de becarios de la planta baja, Raúl, Carlos, Quique, Joaquin, Adrián y Simón)...por compartir conmigo esta primera incursión en el mundo laboral.

Me gustaría hacer especial mención a Sara. Me ayudaste mucho en mis primeros días en TID (que uno suele estar un poco despistado) y es algo que valoro profundamente, además de los buenos momentos que hemos pasado juntas; gracias y espero que seas muy feliz en tu matrimonio!

También quiero agradecer a mi familia la confianza y el apoyo que me han ofrecido siempre.

Y por último, gracias a ti Alex, por todos los apuntes que me has prestado, la tranquilidad que me has proporcionado en los momentos de nerviosismo, las risas, nuestras tonterías, nuestros viajes, por acompañarme a los análisis, por dejarme tu coche, pero sobre todo, por quererme.

Gracias,
Noemi.

Índice General

Resumen	V
Agradecimientos	VI
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XI
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organización de la memoria.....	3
2 Estado del arte	5
2.1 Situación actual de las redes	5
2.2 Previsión de crecimiento del tráfico	6
2.3 Posibles soluciones para retrasar las inversiones de la red.....	8
2.4 Sistemas WDM.....	9
2.4.1 OTM	10
2.4.2 OLA	11
2.4.3 ROADM	12
2.4.4 Cables de FO	13
2.5 Problema RWA.....	14
3 Programación Lineal (LP) aplicada a una red fotónica.....	17
3.1 Introducción a la programación lineal (LP).....	17
3.2 Resolución de un LP	18
3.2.1 Método escogido para la resolución del LP mediante el CPLEX	19
3.3 Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica	24
3.2.2 Procesado del resultado en Matlab	25
4 Optimización de caminos teniendo en cuenta supervivencia en la red.....	29
4.1 Supervivencia en red fotónica	29
4.2 Algoritmos de planificación para supervivencia de red mediante el esquema de protección 1+1	30
4.2.1 Método del Camino Disjunto	30
4.2.2 Método de Optimización Conjunta	32
4.3 Algoritmos de planificación para supervivencia de red mediante el esquema de restauración.....	34
4.3.1 Fallo Simple.....	36

4.3.2 Fallo Doble	36
5 Optimización de caminos teniendo en cuenta limitaciones de la capa física.....	37
5.1 Introducción a los efectos físicos en transmisión óptica	37
5.1.1 Relación Señal a Ruido	40
5.1.2 Dispersión por modo de polarización.....	41
5.1.3 Dispersión cromática	42
5.1.4 No linealidades	44
5.1.5 Atenuación.....	44
5.1.6 El efecto negativo de la concatenación de filtros	45
5.1.7 Conclusiones.....	45
5.2 Estructura y parámetros del sistema de comunicación considerado.....	46
5.3 Cálculo de OSNR y PMD de un camino	48
5.4 Impacto de las limitaciones físicas en planificación	50
5.5 Algoritmo PLIA-R.....	52
6 Resultados de las planificaciones	57
6.1 Escenario de simulaciones.....	57
6.1.1 Malla fotónica.....	57
6.1.2 Demanda de tráfico.....	60
6.2 Algoritmos implementados.....	61
6.3 Representación de las soluciones	62
6.4 Obtención de los caminos de trabajo	62
6.5 Obtención de caminos considerando protección	67
6.5.1 Esquema de protección 1+1.....	67
6.5.2 Esquema de restauración	73
6.6 Obtención de caminos considerando limitaciones físicas	74
7 Conclusiones y trabajo futuro	83
7.1 Conclusiones.....	83
7.2 Trabajo futuro	83
7.3 Publicaciones derivadas de este proyecto.....	84
Glosario	I
Bibliografía.....	III
Anexos.....	VI

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de red actual.	5
Figura 2: Evolución de tráfico IP mundial previsto por Cisco [2].	7
Figura 3: Composición del tráfico del segmento residencial [2].	7
Figura 4: Concepto de descarga de flujo a la red óptica.	9
Figura 5: Esquema CWDM frente al DWDM.	10
Figura 6: Sistema DWDM.	10
Figura 7: OTM en transmisión (izquierda) y en recepción (derecha).	11
Figura 8: Diagrama de un EDFA.	11
Figura 9: Estructura de un ROADM de grado 2.	12
Figura 10: Esquema de un OXC.	13
Figura 11: Esquema de ROADM de JDSU.	13
Figura 12: Cable de fibras ópticas.	13
Figura 13: Construcción de matrices en Matlab a partir de la descripción del problema.	20
Figura 14: Interacción con el CPLEX.	22
Figura 15: Protección 1+1 dedicada (izquierda) y restauración (derecha).	30
Figura 16: Punto de partida (ruta de trabajo).	30
Figura 17: Solución del método (ruta de supervivencia disjunta de la de trabajo).	31
Figura 18: Ejemplo de optimización conjunta.	33
Figura 19: Relación BER – OSNR.	38
Figura 20: Métodos para considerar las restricciones físicas en el problema RWA.	39
Figura 21: Efecto de la OSNR sobre la potencia de una señal.	41
Figura 22: Efecto de la PMD sobre la señal.	42
Figura 23: Efecto de la CD sobre la señal.	43
Figura 24: Efecto de la Atenuación sobre la señal.	45
Figura 25: Esquema del sistema de comunicación considerado.	47
Figura 26: Esquema del sistema de comunicación considerado con ROADMs.	48
Figura 27: Porcentaje de caminos posibles frente al umbral de OSNR requerido para 10 Gbps.	50
Figura 28: Porcentaje de caminos posibles frente al umbral de OSNR requerido para 40 Gbps.	51
Figura 29: Porcentaje de caminos posibles frente a la máxima PMD permitida para 40 Gbps.	52
Figura 30: Topología original de la red troncal de Alemania o DTnet.	58
Figura 31: Topología modificada para proporcionar protección.	60
Figura 32: Estado de la red tras una planificación mediante el algoritmo del camino más corto.	63
Figura 33: Estado de la red tras una planificación mediante el ILP individual.	64
Figura 34: Histogramas de la ocupación por enlace para a) SP y b) ILP.	65
Figura 35: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) SP y b) ILP.	66
Figura 36: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) ILP y b) SP.	66
Figura 37: Estado de la red tras una planificación de los caminos de trabajo y de protección mediante el SP.	68
Figura 38: Estado de la red tras una planificación de los caminos de trabajo mediante el SP y los de protección mediante un ILP.	69

Figura 39: Estado de la red tras una planificación de los caminos de trabajo y de protección mediante el ILP conjunto.....	70
Figura 40: Histogramas de la ocupación por enlace para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.	71
Figura 41: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.....	71
Figura 42: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.	72
Figura 43: Comparación de los diferentes algoritmos para la restauración de fallo simple en términos del número de circuitos del enlace más cargado.....	73
Figura 44: Comparación de los diferentes algoritmos para la restauración de fallo doble en términos del número de circuitos en el enlace más cargado.....	74
Figura 45: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de circuitos en el enlace más cargado para un escenario de 10 Gbps y sin protección.	75
Figura 46: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de regeneradores necesarios para un escenario de 10 Gbps y sin protección.	75
Figura 47: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de circuitos en el enlace más cargado para un escenario de 40 Gbps y sin protección.	76
Figura 48: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de regeneradores necesarios para un escenario de 40 Gbps y sin protección.	76
Figura 49: Estado de la red tras una planificación mediante ILP teniendo en cuenta las restricciones físicas y nodos de regeneración en Hannover, Leipzig y Frankfurt para un escenario de 10 Gbps.	77
Figura 50: Estado de la red tras una planificación mediante ILP teniendo en cuenta las restricciones físicas y nodos de regeneración en Hannover, Leipzig y Frankfurt para un escenario de 40 Gbps.	78
Figura 51: Histogramas de la ocupación por enlace para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.....	79
Figura 52: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.	80
Figura 53: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.	80

Índice de Tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas de un Pre-Amplificador.	11
Tabla 2: Especificaciones técnicas de un Booster.	12
Tabla 3: Parámetros ópticos de la fibra SMF estándar.	14
Tabla 4: Parámetros geométricos de la fibra SMF estándar.	14
Tabla 5: Descripción de los comandos del CPLEX.	21
Tabla 6: Matriz caminos de trabajo por enlaces.	26
Tabla 7: Matriz caminos de trabajo por nodos.	26
Tabla 8: Matriz ruta de trabajo nodos ids.	27
Tabla 9: Ganancia y Figura de ruido de cada elemento.	47
Tabla 10: Valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la OSNR y PMD de un <i>lightpath</i>	50
Tabla 11: Correspondencia de los enlaces y sus distancias.	59
Tabla 12: Demanda de conexiones.	61
Tabla 13: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.	65
Tabla 14: Comparativa de la distancia en km por camino de trabajo para los distintos algoritmos.	66
Tabla 15: Comparativa del número de saltos por camino de trabajo para los distintos algoritmos.	67
Tabla 16: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.	71
Tabla 17: Comparativa de la distancia en km por camino para los distintos algoritmos.	72
Tabla 18: Comparativa del número de saltos por camino para los distintos algoritmos.	72
Tabla 19: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.	79
Tabla 20: Comparativa de la distancia en km por camino para los distintos algoritmos.	80
Tabla 21: Comparativa del número de saltos por camino para los distintos algoritmos.	81

1

Introducción

1.1 Motivación

Las redes ópticas de conmutación de longitudes de onda (WSON – *Wavelength Switched Optical Networks*) y de multiplexación por división de longitud de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) han sido ampliamente reconocidas como tecnologías clave para soportar el continuo crecimiento del tráfico, especialmente de Internet, por ser ideales para acomodar todas las demandas de una manera económicamente atractiva.

Una red óptica es un conjunto de equipos conectados mediante enlaces punto a punto de tal forma que la transmisión se realiza a nivel óptico y la conmutación es OTN/SDH (*Optical Transport Network/Synchronous Digital Hierarchy*), mientras que, se utiliza el término de red fotónica para denominar aquella red en que la conmutación también se realiza a nivel óptico. En este proyecto no se va a tener en cuenta la conmutación OTN/SDH y por tanto utilizaremos indistintamente los dos términos, red óptica y red fotónica.

Para un operador de red una óptima distribución de los flujos de tráfico de datos permite minimizar los costes de inversión y evitar la aparición de potenciales cuellos de botella (congestión) en determinados puntos de la red. En el caso de una malla fotónica, mediante la planificación se busca esta distribución óptima. Además, la red incorporará un mecanismo que encamine los flujos en tiempo real de la mejor forma posible, emulando el comportamiento planificado. Este proyecto se centra en los algoritmos de planificación, en concreto sobre el encaminamiento y asignación de longitud de onda.

El problema, conocido como RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), consiste en encontrar el conjunto de nodos y enlaces (camino) y la longitud de onda que tiene que utilizar la señal luminosa para llevar la información de un nodo origen a un nodo destino. Generalmente, se realiza primero una búsqueda del camino (R) y acto seguido se comprueba que haya una longitud de onda disponible (WA), entre las 80

que, hoy en día, se suele considerar en una fibra óptica, para asignársela a dicho camino.

El problema RWA ha sido ampliamente estudiado y por ello existen numerosos algoritmos para llevar a cabo el encaminamiento, como por ejemplo los denominados algoritmos heurísticos. Según [1], “*en programación se dice que un algoritmo es heurístico cuando la solución no se determina en forma directa, sino mediante ensayos, pruebas y reensayos*”. Entre ellos, el más conocido es el algoritmo del camino más corto (SP - *Shortest Path*), que como su propio nombre indica, encuentra el camino más corto (en relación a una determinada unidad de medida o coste) entre el nodo origen y el nodo destino.

Entre las técnicas de asignación de longitud de onda destacan el “*First Fit*” (FF) y el “Coloreado de grafo”. En la sección **2.5 Problema RWA** se describirán y detallarán éstas y otras técnicas de asignación de longitud de onda; sin embargo, este proyecto se va a centrar sólo en el problema del encaminamiento (R). Se propondrá en el capítulo 8 una línea de trabajo futuro para realizar la asignación de longitud de onda al mismo tiempo que el encaminamiento, que en el caso de los problemas de programación lineal, consistiría en añadir variables y restricciones adicionales a los algoritmos que se proponen en este proyecto.

Los últimos estudios llevados a cabo por Telefónica I+D, empresa con la que se ha colaborado para realizar este proyecto, han logrado llegar a una solución eficaz y eficiente para minimizar el número de longitudes de onda utilizadas en el enlace de mayor carga. En concreto, esta solución se consigue mediante algoritmos de optimización lineal en los procesos de planificación para la parte del encaminamiento y mediante el algoritmo de “Coloreado de Grafo” para la parte de la asignación de longitudes de onda.

Sin embargo, los estudios realizados hasta la fecha no han tenido en cuenta aspectos clave como por ejemplo la tolerancia a fallos múltiples de la red y aún no han llegado a una solución clara para tener en cuenta las restricciones físicas. El presente proyecto contribuye a dar solución a dichos aspectos.

1.2 Objetivos

Hoy en día dos de los problemas principales que interesa tener en cuenta a la hora de plantear los problemas de encaminamiento, y que son objeto de estudio en muchos documentos de la literatura actual, son por un lado, la provisión de una ruta de supervivencia en el caso de fallo de un elemento de la ruta de trabajo (o ruta principal) y por otro, la minimización de las degradaciones que sufre la potencia de la señal a lo largo del camino debido a limitaciones de la capa física tales como la atenuación, pérdidas de inserción, emisión espontánea de ruido (ASE), dispersión cromática y por modo de polarización, etc., propias de la fibra óptica y que tienen un papel muy importante en la planificación del tráfico.

La finalidad de este Proyecto Final de Carrera (PFC) consiste en la continuación de dichos estudios para proporcionar una ruta óptima de protección ante casos de fallos

simples y dobles en la red y, por otro lado, tener en cuenta las limitaciones físicas que introduce la capa óptica.

El objetivo principal se centra en realizar el algoritmo de encaminamiento mediante un tipo de formulación, denominada LP (*Linear Program*), que permite plantear el problema en forma de ecuaciones lineales y encontrar una solución óptima. Adicionalmente, se va a realizar una comparación con el algoritmo del camino más corto (SP), que es utilizado de manera estándar por los quipos comerciales para el encaminamiento.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: En el presente capítulo se realiza una breve introducción donde se muestran las principales motivaciones y objetivos del proyecto.
- Capítulo 2: Se resume el estado del arte de la situación actual de las redes de comunicaciones, se muestran las previsiones de tráfico para los próximos años y se presentan algunas de las soluciones actualmente en estudio para abordar dicha demanda. Adicionalmente, se realiza un repaso a los sistemas WDM, que serán la base sobre la que se sustentan los algoritmos de planificación presentados en este proyecto, y una introducción al problema RWA.
- Capítulo 3: Recoge una introducción de la formulación ILP y se describe la metodología utilizada para su uso sobre una red fotónica.
- Capítulo 4: Se explican las distintas técnicas consideradas para proporcionar a la red de tolerancia ante múltiples fallos y se describen detalladamente los algoritmos propuestos tanto para fallo simple como para fallo doble.
- Capítulo 5: Se introducen los efectos físicos presentes en la transmisión por fibra óptica y se presenta la estructura de cable de fibra utilizado para las simulaciones junto con los parámetros necesarios. Además, se explica la forma para obtener sus valores analíticamente y se comprueba su efecto sobre unos caminos genéricos. Por último, se describe detalladamente el algoritmo propuesto que tienen en cuenta las restricciones físicas en el encaminamiento.
- Capítulo 6: Se presenta el escenario de red para la ejecución de los algoritmos implementados, los resultados de las simulaciones y comparación con los del algoritmo del camino más corto.
- Capítulo 7: En el último capítulo se recogen las conclusiones extraídas, las posibles líneas de trabajo futuro y la publicación derivada del proyecto.

2

Estado del arte

2.1 Situación actual de las redes

Las redes de comunicaciones ópticas son una excelente alternativa para la transmisión de información ya que proporcionan un gran ancho de banda, transparencia, fiabilidad y flexibilidad, por ello se ha estudiado y se sigue estudiando su aplicación en todas los segmentos de la red, esto es, acceso, transporte regional y transporte nacional.

En la red actual (como se puede observar en la Figura 1) la mayor parte del acceso está formado por cable de cobre que lleva al mismo tiempo la voz procedente del servicio de telefonía y los datos mediante el conocido ADSL. Sin embargo, los bucles de abonado basados en pares de cobre se irán sustituyendo poco a poco por enlaces de fibra óptica utilizando tecnologías FTTX para permitir el acceso a la red a altas velocidades.

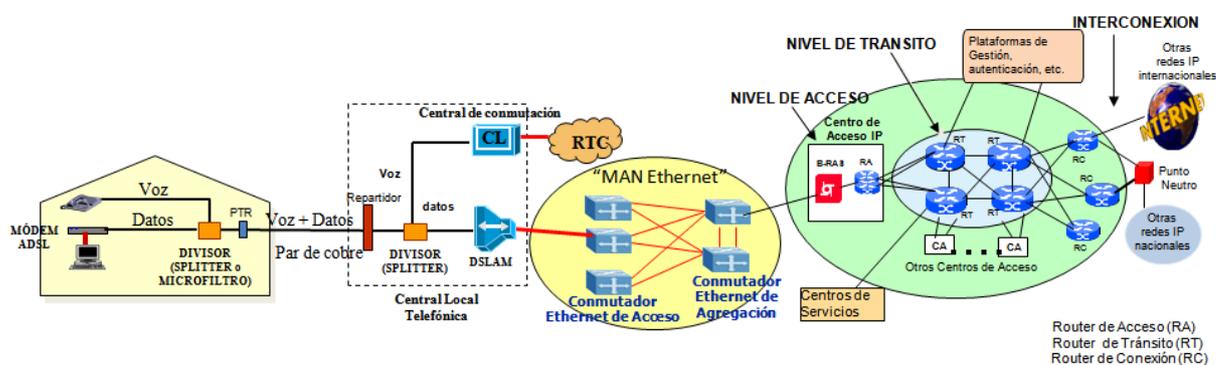


Figura 1: Esquema de red actual.

En cuanto al segmento de transporte regional, éste suele estar basado en topologías en anillos. Cabe mencionar que sus enlaces son ya de fibra óptica y su

tecnología de transmisión es Ethernet y SDH. Actualmente, se están llevando a cabo estudios para ampliar su capacidad, puesto que se teme que no va a ser capaz de albergar todo el tráfico previsto para los próximos años.

El segmento en el que se centra este proyecto es la red de transporte nacional. Actualmente está formada por routers IP interconectados por enlaces punto a punto de fibra óptica con equipos denominados OADMs (*Optical Add-Drop Multiplexer*) que tienen que ser configurados a mano para la provisión de circuitos. Sin embargo, este segmento de red está sufriendo una transformación para convertirse en una red mallada de fibra óptica reconfigurable basada en ROADMs (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) en la que tanto la transmisión como la conmutación son fotónicas.

Según datos internos de Telefónica, en la red de transporte nacional, el 95% del tráfico que se transmite por ella son datos, mientras que el resto, alrededor del 5%, corresponde a la voz. Dicho tráfico se envía actualmente por medio de la tecnología WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) sobre la fibra mediante canales tributarios JDS (Jerarquía Digital Síncrona, en inglés SDH).

2.2 Previsión de crecimiento del tráfico

Como ya se ha comentado en el anterior apartado, actualmente el 95% del tráfico que circula por la red de transporte nacional son datos. Sin embargo, se espera un gran aumento de tráfico de datos para los próximos años. Merece la pena destacar la previsión de crecimiento llevada a cabo por uno de los grandes fabricantes de equipos de red a nivel mundial, Cisco [2]. Los datos se confirman también a nivel nacional como se puede ver en [3] donde se observa un crecimiento del tráfico de alrededor del 50% anual.

El estudio de Cisco prevé que el tráfico IP global se quintuple entre 2008 y 2013. Como se observa en la Figura 2, se espera que todo el tráfico IP crezca hasta alcanzar 56 exabytes por mes en 2013, lo cual significa una tasa de crecimiento anual (CAGR - *Composite Annual Growth Rate*) del 40% entre 2008 y 2013.

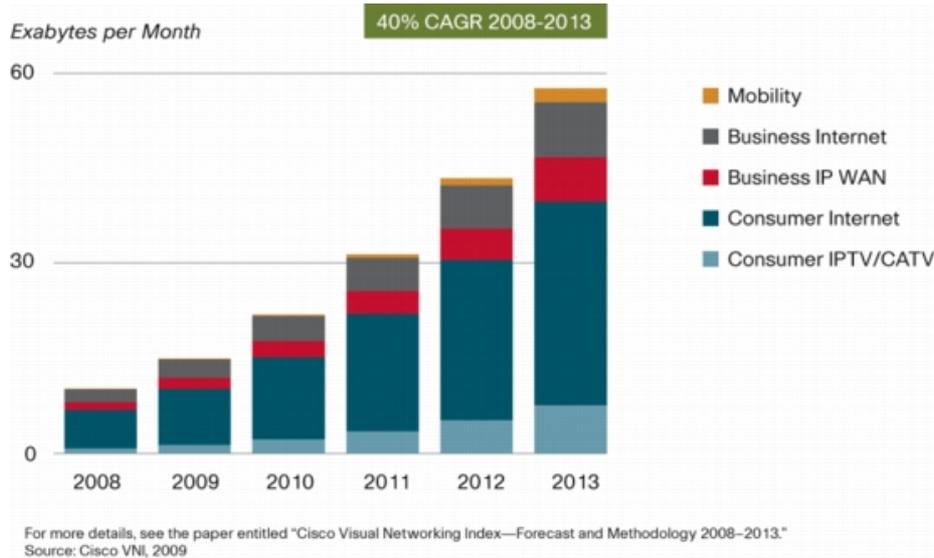


Figura 2: Evolución de tráfico IP mundial previsto por Cisco [2].

El tráfico del segmento residencial (Figura 3) se deberá principalmente al Video on Demand “VoD” (8 exabytes por mes en 2013), streams de video, descargas Internet (18 exabytes por mes en 2013) y el intercambio de archivos a través de P2P.

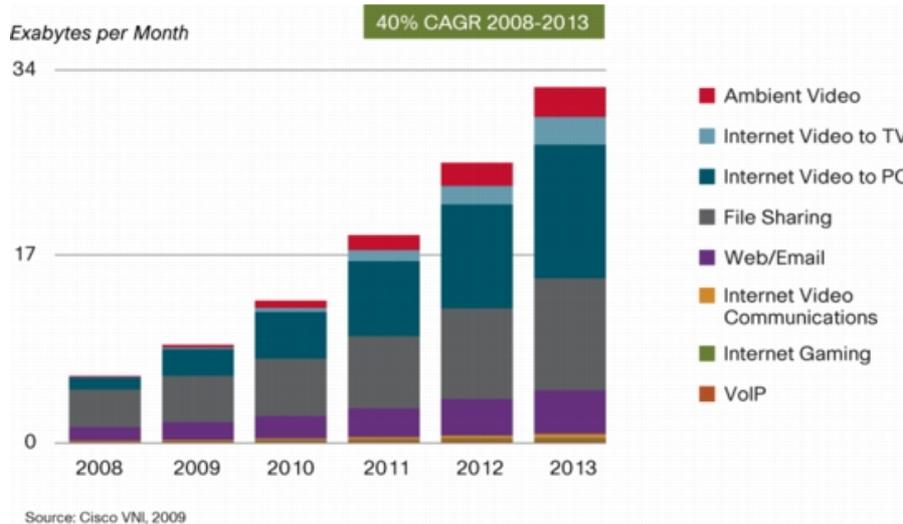


Figura 3: Composición del tráfico del segmento residencial [2].

Tanto los fabricantes como las operadoras son conscientes de que el tráfico va a seguir aumentando de forma considerable y por ello están trabajando para aumentar la capacidad de las redes. Como primera opción, previa al despliegue de nuevos enlaces y equipos, sus soluciones se basan en la búsqueda de herramientas y tecnologías que permitan aprovechar al máximo la capacidad de los recursos existentes.

2.3 Posibles soluciones para retrasar las inversiones de la red

Dentro del mundo industrial y académico, se están llevando a cabo múltiples estudios con el objetivo de minimizar el coste de las redes, retrasar las futuras inversiones y al mismo tiempo aumentar la capacidad para poder albergar todas las demandas previstas para los próximos años.

Entre las técnicas con mayor impacto en los últimos años para lograr estos objetivos se encuentran por ejemplo:

- Formatos de modulación que aumenten la tasa total de transmisión. Esto es, se puede transmitir una señal directa de alta velocidad como por ejemplo con el formato DP-QPSK [4] o varias en paralelo de menor velocidad como la opción DMC (*Dense Multi-Carrier*) [5] propuesta por el fabricante OpVista, basada en la modulación de sub-portadoras.
- Diseño de equipos de transmisión que permitan trabajar a altas velocidades, procesar los formatos de modulación anteriormente mencionados, que la degradación generada a la señal sea lo menor posible e incluso que puedan compensar los efectos causados en la señal.
- Nuevas tecnologías de nivel 2. Actualmente existe una discusión entre PBB-TE y MPLS-TP [6].

En cuanto a los distintos segmentos de la red:

- En el **acceso** se irá produciendo una transición progresiva desde los cables de cobre a la fibra óptica, la conocida tecnología FTTX que permite un acceso de banda ancha de muy alta capacidad.
- En transporte **regional** hay una propuesta denominada OBS (*Optical Burst Switching*) [7] mediante la cual se pueden reducir el número de interfaces. Esto se consigue asignando una frecuencia a cada nodo. De esta forma, cuando un nodo quiere transmitir información a otro, éste se sintoniza a la frecuencia correspondiente al del receptor y envía la información a través de una longitud de onda.
- Dado que la conmutación a nivel IP (electrónica) es más cara que la conmutación a nivel óptico, en transporte **nacional** se está estudiando una técnica consistente en descargar todo o parte del tráfico IP a la malla fotónica [8] para lograr un ahorro en el número de interfaces en los equipos (routers) ya que los datos sólo se procesan en los equipos donde es estrictamente necesario. En la Figura 4 se puede apreciar una diferencia entre el procesado que sufren los datos IP en la red de transporte (línea verde) frente al procesado que sufrirían con la técnica de descarga a la malla fotónica (línea morada). Como se puede observar, para este caso en el que se quieren transmitir datos del router A al router C, los interfaces del router B dejarían de utilizarse y por lo tanto se reduciría el coste de la red.

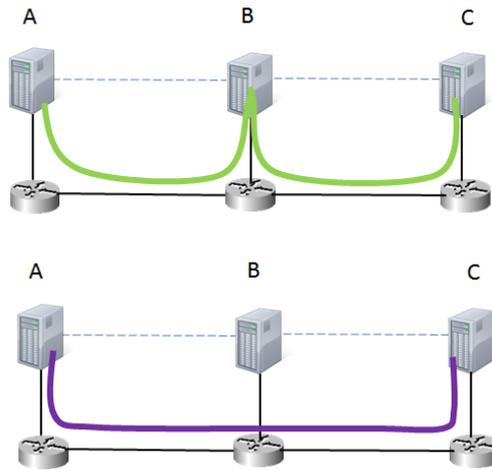


Figura 4: Concepto de descarga de flujo a la red óptica.

La tecnología WDM se va a ver altamente impulsada por esta técnica de descarga de tráfico puesto que para aprovechar toda la capacidad que proporciona la fibra óptica va a ser necesaria una gran cantidad de longitudes de onda para albergar todo el tráfico previsto. Por ello, es de gran importancia la búsqueda de un algoritmo que encamine la demanda de tráfico de una forma eficaz y eficiente para minimizar los costes de la red, retrasar las inversiones futuras y evitar congestiones de los enlaces.

2.4 Sistemas WDM

La fibra proporciona unos 50THz de ancho de banda espectral pero la electrónica sólo puede alcanzar actualmente niveles de hasta 100 Gbps. Para superar esta limitación existen actualmente varias alternativas:

- Multiplexación por división en el espacio (SDM - *Space Division Multiplexing*): consiste en utilizar una fibra por cada canal.
- Multiplexación por división en el tiempo (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*): se transmiten varios canales sobre la misma fibra utilizando una longitud de onda distinta para cada canal.

De entre las dos alternativas es evidente que la más adecuada para un operador es la segunda, WDM, puesto que SDM exige una mayor inversión. Entre los sistemas WDM se pueden encontrar los “*coarse*” WDM (CWDM) o los “*dense*” WDM (DWDM). La diferencia entre ambos se basa en el número de canales que pueden albergar y el espaciado entre ellos, lo cual a su vez representa una diferencia importante en sus precios. En el contexto de una red troncal/nacional es habitual considerar 80 longitudes de onda por fibra, lo cual viene definido por el tamaño de la rejilla, en este caso es de 50GHz para que quepan los 80 canales WDM. La Figura 5 muestra la diferencia entre ambas, pero en ella la rejilla es de 200GHz y por tanto sólo caben 20 canales DWDM.

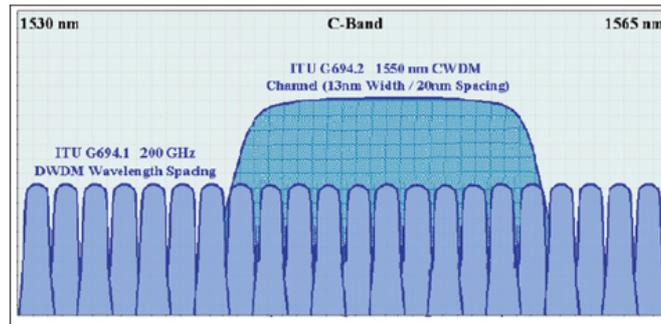


Figura 5: Esquema CWDM frente al DWDM.

Un sistema DWDM típico está formado por terminales multiplexor y demultiplexor ópticos (OTM - *Optical Terminal Multiplexer*), amplificadores ópticos de línea (OLA - *Optical Line Amplifier*), terminales de inserción y extracción ópticos (ROADM - *Reconfigurable Add/Drop Multiplexer*) y cables de fibra óptica. La siguiente figura muestra un esquema básico de un sistema DWDM.

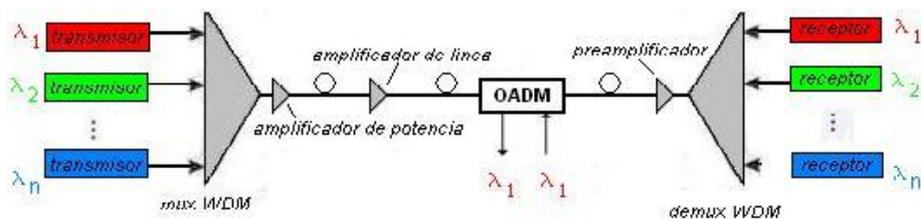


Figura 6: Sistema DWDM.

2.4.1 OTM

Los terminales multiplexores ópticos (OTM - *Optical Terminal Multiplexer*) se encargan de multiplexar en transmisión (Figura 7 izquierda) y demultiplexar en recepción (Figura 7 derecha) los canales ópticos. Mediante unos filtros con rejillas de guía-onda en forma de matriz, permiten acoplar y desacoplar un número relativamente alto de canales ópticos con un espaciamiento en longitud de onda muy pequeño, con bajas pérdidas y alto aislamiento. El encargado de adaptar las longitudes de onda recibidas a una longitud de onda estandarizada, estable y susceptible de ser multiplexada y demultiplexada es el transpondedor.

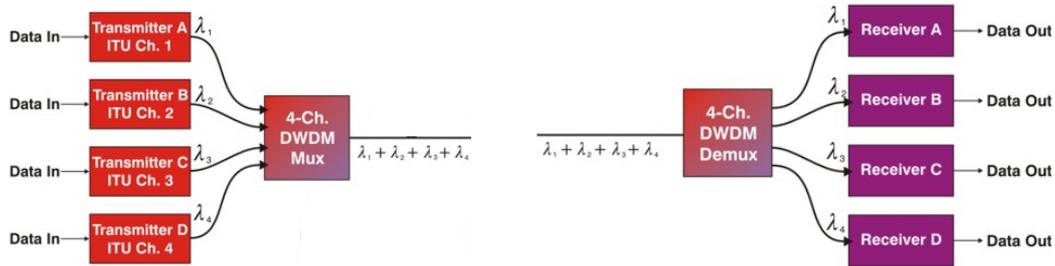


Figura 7: OTM en transmisión (izquierda) y en recepción (derecha).

2.4.2 OLA

La misión de un amplificador óptico de línea (OLA - *Optical Line Amplifier*) es amplificar la señal multiplexada en longitud de onda, es decir, sin ningún tipo de conversión electro-óptica. Para el desarrollo de WDM resultó clave la aparición de los amplificadores EDFAs (Figura 8) que permiten amplificar todos canales a la vez.

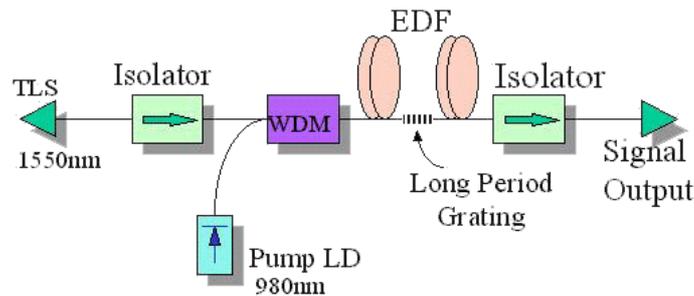


Figura 8: Diagrama de un EDFA.

Las siguientes tablas muestran un ejemplo de las características de amplificadores comerciales, en concreto del fabricante Telnet. En concreto la primera tabla (Tabla 1) corresponde a un pre-amplificador, cuya misión es la amplificación previa a la entrada del receptor, y la segunda tabla (Tabla 2) de un Booster, encargado de la amplificación a la salida del transmisor.

Tabla 1: Especificaciones técnicas de un Pre-Amplificador.

Parámetro	Min.	tip.	Max
Rango de ancho de banda	1530nm		1562nm
Potencia de entrada	-30dBm	-18dBm	-15dBm
Potencia de salida	4dBm		
Ganancia		20dB	
Figura de Ruido @Pin=-18dBm		4.8dB	5.5dB
PDL			0.5dB
PMD			0.5ps
Rango de temperaturas de operación	0°		65°

Tabla 2: Especificaciones técnicas de un Booster.

Parámetro	Min.	tip.	Max
Rango de ancho de banda	1530nm		1562nm
Potencia de entrada	-6dBm	-2dBm	2dBm
Potencia de salida	+18dBm		
Ganancia		20dB	
Figura de Ruido @Pin=-18dBm		5.0dB	6.0dB
PDL			0.5dB
PMD			0.5ps
Rango de temperaturas de operación	0°		65°

2.4.3 ROADM

La misión de un terminal de inserción y extracción óptico (ROADM - *Reconfigurable Add/Drop Multiplexer*) es extraer información de un determinado canal óptico e insertar nueva información reutilizando o no dicho canal, sin alterar el resto de canales multiplexados en longitud de onda y sin ningún tipo de conversión electro-óptica. Se denomina *grado* al número de puertos de entrada-salida disponibles en el equipo, por ejemplo la Figura 9 muestra un ROADM de grado 2.

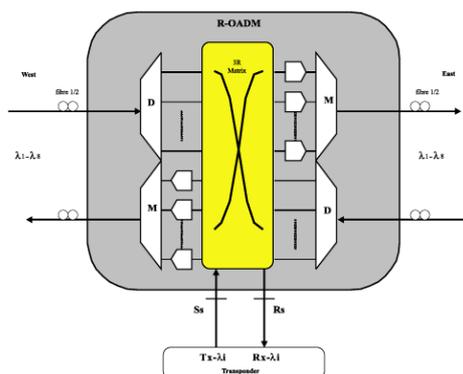


Figura 9: Estructura de un ROADM de grado 2.

Sin embargo existen también ROADMs con un mayor grado que incluyen además la funcionalidad de conmutación, que estaba dedicada anteriormente a los cross-conectores ópticos (OXC - *Optical Cross Connects*). El OXC (Figura 10) es un conmutador de canales entre fibras de entrada y fibras de salida; es, por lo tanto, el elemento que proporciona mayor flexibilidad en la red y por limitaciones actuales en la tecnología óptica la mayoría de los dispositivos comercialmente disponibles realizan conversión electro-óptica limitando su transparencia.

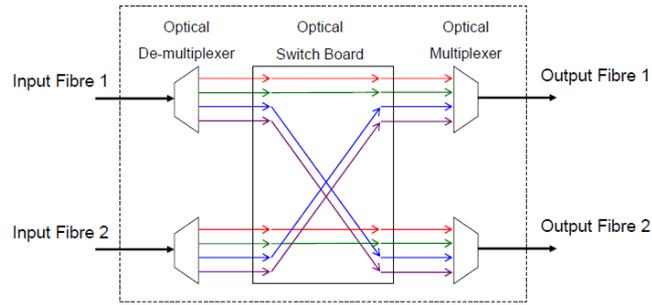


Figura 10: Esquema de un OXC.

La mayoría de los ROADMs actuales son de grado mayor que 2 (hasta un máximo de 9), es decir, además de extraer e insertar pueden conmutar canales, como por ejemplo el ROADM (Figura 11) presentado por el fabricante JDSU [9].

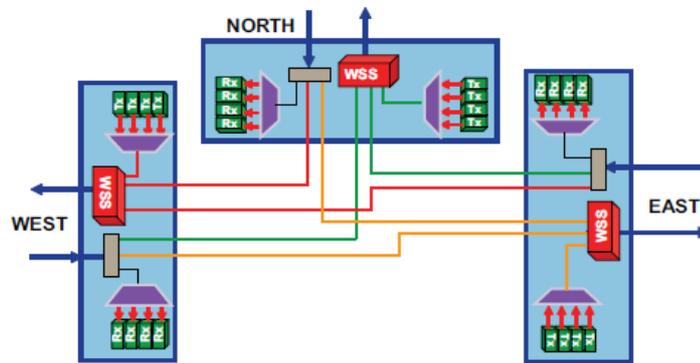


Figura 11: Esquema de ROADM de JDSU.

2.4.4 Cables de FO

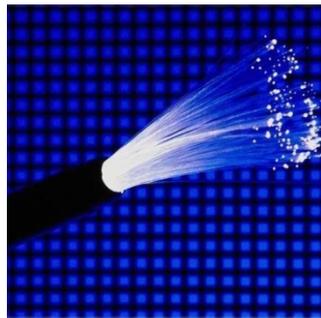


Figura 12: Cable de fibras ópticas.

La fibra ITU-T G-652, también conocida como SMF estándar, es la fibra comúnmente más desplegada. Presenta una estructura simple de salto de índice y opera en la segunda y la tercera ventanas (1310 y 1550 nm respectivamente). En las siguientes tablas de un suministrador se pueden ver algunos de valores típicos de este tipo de fibras.

Tabla 3: Parámetros ópticos de la fibra SMF estándar.

Parámetros ópticos	Fibra no cableada	Fibra cableada
Atenuación a 1310 nm	$\leq 0,35$ dB/Km	$\leq 0,37$ dB/Km
Atenuación a 1550 nm	$\leq 0,21$ dB/Km	$\leq 0,24$ dB/Km
Atenuación en 1285-1330 nm	$\leq 0,40$ dB/Km	
Atenuación en 1525 -1575 nm	$\leq 0,25$ dB/Km	
Punto de discontinuidad máxima en 1310 y 1550 nm	$\leq 0,05$ dB	
Longitud de onda de corte	1100 - 1300 nm	≤ 1260 nm
Punto de dispersión cero	1300-1324 nm	
Pendiente de dispersión cero	$\leq 0,092$ ps/nm ² .Km	
Dispersión cromática en 1285 –1330 nm	$\leq 3,5$ ps/nm.Km	
Dispersión cromática en 1270 - 1350 nm	$\leq 5,3$ ps/nm.Km	
Dispersión cromática en 1550 nm	$\leq 18,0$ ps/nm.Km	
PMD fibra individual	$\leq 0,15$ ps/ $\sqrt{\text{Km}}$	
PMDq (Q=0,01%, N=20)	$\leq 0,10$ ps/ $\sqrt{\text{Km}}$	

Tabla 4: Parámetros geométricos de la fibra SMF estándar.

Parámetros geométricos	
Diámetro de campo modal 1310 nm	$9,20 \pm 0,40$ μm
Diámetro de campo modal 1550 nm	$10,50 \pm 0,80$ μm
Error concentricidad núcleo/cladding	$\leq 0,4$ μm
Diámetro cladding	$125,0 \pm 1,0$ μm
Error concentricidad coating/cladding	≤ 12 μm
No circularidad coating	≤ 10 %
Diámetro coating (coloreado)	250 ± 15 μm

2.5 Problema RWA

En una malla fotónica un “camino de luz”, también conocido como “*lightpath*”, es un camino óptico establecido entre dos nodos no necesariamente adyacentes [10]. Cada camino de luz utiliza una longitud de onda, y dos caminos pueden utilizar la misma longitud de onda siempre y cuando no se propaguen por la misma fibra. El hecho de que el *lightpath* mantenga la misma longitud de onda a lo largo de todo el camino, se conoce como restricción de continuidad de longitud de onda. Esta restricción puede evitarse colocando convertidores de longitud de onda en algunos de los nodos o incluso en todos, sin embargo, la tecnología de conversión de longitud de onda totalmente óptica no está actualmente madura. En este proyecto consideraremos la restricción de continuidad de longitud de onda.

Por lo tanto, el problema de encaminamiento de las demandas de tráfico consiste en buscar un camino de luz o *lightpath* entre el nodo origen y el nodo destino y una longitud de onda disponible de las 80 consideradas generalmente en cada enlace de fibra. A este problema se le denomina problema de encaminamiento y asignación de longitud de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) y ha sido ampliamente estudiado [11][12][13][14]. En la mayoría de los casos se divide en problema en dos sub-problemas de menor complejidad: por un lado la búsqueda del camino óptimo (sub-

problema R) y por otro la búsqueda de una longitud de onda disponible (sub-problema WA). Lo más habitual es realizar primero el sub-problema R y a continuación el WA, pero también podría ser al revés.

Entre las diversas alternativas para llevar a cabo el sub-problema WA se pueden encontrar los siguientes algoritmos (en [15] se puede encontrar una explicación más detallada de todos ellos).

- *Random*: Se buscan todas las longitudes de onda disponibles y se selecciona una entre ellas aleatoriamente.
- *First-Fit*: Las longitudes de onda están numeradas. Cuando se necesitan una, se elige la de menor número.
- *Least Used*: Se selecciona la longitud de onda que está menos usada en la red.
- *Most Used*: Se selecciona la longitud de onda que está más usada en la red.
- *Max Sum*: Considera todos los caminos posibles en la red y maximiza las capacidades de los demás caminos después de establecer el *lightpath*.
- *Coloreado de Grafo*: Se construye un grafo auxiliar de tal forma que cada conexión en el sistema se representa con un nodo en el grafo. Hay una unión entre dos nodos del grafo cuando las correspondientes conexiones comparten al menos un tramo de su ruta. Se colorea (se asigna una longitud de onda) a cada nodo del grafo de tal forma que dos nodos adyacentes no tengan el mismo color.

La más utilizada de ellas es el coloreado de grafo. Sin embargo en este proyecto nos vamos a dedicar exclusivamente en el sub-problema R. Al igual que para la asignación de longitud de onda, para el encaminamiento se han propuesto numerosas técnicas y algoritmos, que se pueden clasificar de forma general en aquellos que encaminan tráfico estático (algoritmos *off-line*) [16] y los que encaminan tráfico dinámico (algoritmos *on-line*) [17].

La metodología de ambos grupos es completamente diferente. Los algoritmos *off-line* son aquellos que toman como entrada una matriz de demandas previamente conocida y por lo tanto se puede plantear todo el problema inicialmente y resolverlo de una sola vez. Por el contrario, los algoritmos *on-line* van encaminando las demandas según éstas van llegando y tienen que buscar un camino considerando el estado de la red en cada momento. Para resolver el sub-problema R mediante un ILP (*Integer Linear Program*) es necesario conocer la matriz de demandas previamente, por lo tanto, en principio no es posible su aplicación en tiempo real.

De los diferentes estudios publicados en la literatura, entre los objetivos que se pueden encontrar a la hora de plantear el problema RWA estático se pueden citar, entre otros:

- Minimizar el retardo [18].
- Minimizar la congestión y el coste [19].
- Maximizar el número de conexiones establecidas, o lo que es lo mismo, minimizar la probabilidad de bloqueo [20].
- Minimizar el número de caminos en el enlace más cargado [13].
- Minimizar el número de fibras [21].

En cambio, para el problema RWA dinámico el objetivo suele ser el minimizar el número de conexiones bloqueadas o maximizar el número de conexiones establecidas en un determinado instante.

Resumiendo, los algoritmos basados en formulación ILP que se van a presentar en este proyecto se corresponden con una planificación de tráfico estático para una demanda de conexiones previamente conocida y en el cual el objetivo es la minimización del número de caminos que atraviesa el enlace más cargado, para dar solución a aspectos clave que otros estudios no han abordado (fallos dobles) o para los que no se ha llegado a una solución clara (restricciones físicas).

3

Programación Lineal (LP) aplicada a una red fotónica

3.1 Introducción a la programación lineal (LP)

La programación lineal (LP) se utiliza para resolver cualquier tipo de problema de optimización que pueda ser descrito mediante ecuaciones lineales. Un problema lineal es un modelo matemático en el cual el objetivo es encontrar un conjunto de valores no negativos para unas variables conocidas que maximicen o minimicen una función objetivo que satisfaga un sistema de restricciones lineales. En el documento [22] los autores realizan una introducción, definen y plantean algunos ejemplos de LPs. Basándonos en dicho documento describimos un problema lineal como:

Notación “matriz”	Notación “sigma”
Max $f x$ Sujeto a $A x \leq b$ $x \geq 0$ $int x$	Max $\sum_j f_j x_j$ Sujeto a $\sum_j a_{ij} x_j \leq b_i$ $x_j \geq 0$ $int x_j$
Donde f es un vector fila de tamaño n x es un vector de variables enteras de tamaño n a es una matriz de restricciones de tamaño m por n b es un vector columna de constantes de tamaño m	

Si en el problema todas las variables a resolver deben ser enteras, entonces se conoce como ILP (*Integer Linear Program*). Si por el contrario, algunas variables son enteras y otras reales, se conoce como MILP (*Mixed Integer Linear Program*).

Los primeros usos de la programación lineal datan del siglo XVIII-XIX, momento en el que Fourier desarrolla un método para la eliminación de variables de un sistema de desigualdades, conocido por el nombre del matemático francés. Además también es usada durante la Segunda Guerra Mundial con el objetivo de reducir el coste del ejército mediante la planificación de los gastos y los retornos. En la actualidad, la programación lineal es ampliamente usada en microeconomía, administración de empresas, finanzas, asignación de tareas, logística, marketing o problemas de flujos de redes y mercancías.

Para ver un ejemplo de problema de programación lineal y su descripción matemática, se plantea el siguiente caso. Una empresa de producción es capaz de fabricar tres productos (llamémosles x_1 , x_2 y x_3) sabiendo que el beneficio que le aporta cada producto es de 65, 80 y 30 unidades monetarias respectivamente. Para ello se sabe que la empresa tiene capacidad para producir cada hora 2 unidades del primer producto, 3 del segundo y 1 del tercero, pero como máximo sólo puede empaquetar 5 unidades a la hora. El objetivo de la empresa es determinar cuáles de los productos fabricar para maximizar sus beneficios. La notación matemática que describe el problema es la que se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & 65 \cdot x_1 + 80 \cdot x_2 + 30 \cdot x_3 \\ \text{Sujeto a} \quad & 2 \cdot x_1 + 3 \cdot x_2 + x_3 \leq 5 \\ & 0 \leq x_1 \leq 1 \\ & 0 \leq x_2 \leq 1 \\ & 0 \leq x_3 \leq 1 \\ & x_1, x_2, x_3 \text{ binarias} \end{aligned}$$

Se han definido las tres variables del problema como binarias de tal forma que ‘0’ significa que la empresa no tiene que producir dicho producto y ‘1’ significa lo contrario, que tiene que producirlo para maximizar sus beneficios.

En el presente proyecto final de carrera se usa la programación lineal para calcular el conjunto de rutas de los circuitos ópticos de una demanda dada.

3.2 Resolución de un LP

Problemas de programación lineal sencillos, como es el caso del ejemplo anterior, pueden ser resueltos gráficamente o incluso analíticamente como puede verse en [23]. Sin embargo, para el problema que define el encaminamiento en una red fotónica, donde el número de variables y de restricciones es muy elevado, existen una serie de programas informáticos llamados “solvers” cuyo objetivo es la resolución de problemas LP, por ejemplo se pueden citar LP_SOLVE [24], AMPL [25] o CPLEX [26].

Para la realización de este proyecto se utilizó en primer lugar el programa LP_SOLVE, que puede resolver con gran facilidad ejemplos sencillos como el anterior,

pero se comprobó que no tenía la capacidad suficiente para la cantidad de variables que se generaban para una red de tamaño real.

Como solución a este inconveniente, se optó por el uso del CPLEX que nos permitía obtener los valores de todas las variables a conocer de un problema de una red real en un tiempo muy inferior al que requería LP_SOLVE. Por lo tanto, todos los resultados mostrados en este documento están obtenidos mediante el uso del CPLEX versión 11.2.

3.2.1 Método escogido para la resolución del LP mediante el CPLEX

El programa CPLEX emplea un formato propietario de archivo (.lp) [27] para describir el problema de programación lineal y desde el cual leerá todos los datos. De la misma forma, escribirá los resultados en un archivo (.sol) con formato XML [28] que tendremos que tratar para obtener la solución en una forma que pueda ser fácilmente legible.

Los pasos que se han seguido para llevar a cabo la definición del problema en Matlab y su posterior resolución mediante el CPLEX, son los que se describen a continuación. No obstante, cabe decir que se podría haber realizado de cualquier otra forma, por ejemplo con java o c.

- 1.- Construcción de las matrices y vectores con los valores del problema en Matlab.
- 2.- Creación del archivo “.lp” con dichas matrices y vectores.
- 3.- Lectura del archivo y optimización del problema por parte del CPLEX.
- 4.- Escritura del resultado en un archivo “.sol” en formato XML.
- 5.- Interpretación de los resultados en matrices de Matlab.

A continuación vemos cada paso detalladamente.

Paso 1: Construcción de las matrices y vectores en Matlab.

De acuerdo a la definición del problema en notación matriz que vimos en el apartado **3.1 Introducción a la programación lineal (LP)** y que como recordamos era:

$$\begin{array}{ll} \text{Max} & f x \\ \text{Sujeto a} & A x \leq b \\ & x \geq 0 \\ & \text{int } x \end{array}$$

el primer paso consiste en la creación de la matriz A y los vectores f y b . Además, se define el vector e que toma los siguientes valores en función del signo de la inecuación (para el ejemplo presentado este vector está formado por un elemento puesto que sólo hay una restricción del tipo $A x \leq b$):

$$e = \begin{cases} 1 & \text{si } \geq \\ -1 & \text{si } \leq \\ 0 & \text{si } = \end{cases}$$

La Figura 13 nos muestra el método para transformar el problema en matrices y vectores de Matlab.

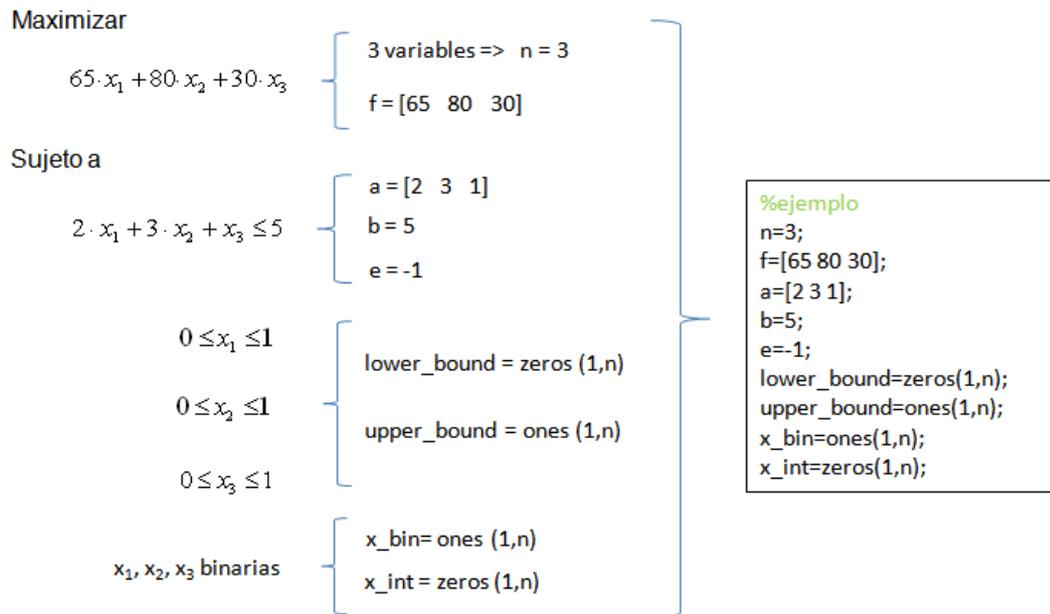


Figura 13: Construcción de matrices en Matlab a partir de la descripción del problema.

Paso 2: Creación del archivo “lp”.

La sintaxis del formato lp [27], formato nativo de CPLEX para leer y escribir modelos de LP, consiste en un conjunto de expresiones algebraicas y unas declaraciones en el siguiente orden:

<función objetivo>
 <restricciones>
 <declaraciones>

Donde

<función objetivo> es la combinación lineal de variables y constantes que indican el objetivo del problema.

<restricciones> es el conjunto de restricciones del problema.

<declaraciones> definen las variables como enteras (general) o binarias (binary). Si las variables no se definen de ningún tipo, entonces se asumen reales.

El siguiente bloque de código es el tipo de archivo “lp” para el ejemplo del apartado anterior:

```

maximize
65X1 + 80X2 + 30X3
subject to
2X1 + 3X2 + 1X3 <= 5
bounds
0 <= X1 <= 1
0 <= X2 <= 1
0 <= X3 <= 1
general
binary
X1
X2
X3
end
    
```

Paso 3: Lectura del archivo y optimización del problema por parte del CPLEX.

Las instrucciones que permite realizar el CPLEX [26] se muestran resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 5: Descripción de los comandos del CPLEX.

Comando	Descripción
Add	Añadir restricciones al problema
Baropt	Resolver utilizando el algoritmo de barrera
change	Cambiar el problema
Display	Mostrar el problema, la solución o los parámetros por pantalla
Enter	Introducir un problema nuevo
Help	Proporcionar información sobre los comandos
Mipopt	Resolver un MILP
Netopt	Resolver un problema utilizando métodos de red
Optimize	Resolver el problema
Primopt	Resolver utilizando el método primal
Quit	Salir del CPLEX
Read	Leer el problema o la información de un archivo
Set	Ajustar parámetros
Tranopt	Resolver utilizando el método dual
Write	Escribir el problema o la información en un archivo
xecute	Ejecutar un comando del sistema operativo

Sin embargo, con el uso de tan sólo tres de estas instrucciones es posible leer el problema del archivo “.lp” (*read*), resolver el LP (*optimize*) y escribir el resultado en el archivo “.sol” (*write*), como se puede observar en la siguiente figura.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

C:\ILOG\CPLEX112\bin\x86_win32>cplex

Welcome to CPLEX Interactive Optimizer 11.2.1
  with Simplex, Mixed Integer & Barrier Optimizers
Copyright (c) ILOG 1997-2008
CPLEX is a registered trademark of ILOG

Type 'help' for a list of available commands.
Type 'help' followed by a command name for more
information on commands.

CPLEX> read output.lp
Problem 'output.lp' read.
Read time = 0.02 sec.
CPLEX> optimize
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve modified 4 coefficients.
Reduced MIP has 1 rows, 3 columns, and 3 nonzeros.
Reduced MIP has 3 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = -0.00 sec.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: none, using 1 thread.
Root relaxation solution time = -0.00 sec.

      Nodes
      Node  Left   Objective  IInf  Best Integer      Cuts/
      *    0+   0      integral    0      0.0000    Best Node  ItCnt  Gap
      *    0    0      integral    0     145.0000   145.0000    1      0.00%

Solution pool: 2 solutions saved.

MIP - Integer optimal solution: Objective = 1.4500000000e+002
Solution time = 0.00 sec. Iterations = 1 Nodes = 0

CPLEX> write datos.sol
Incumbent solution written to file 'datos.sol'.
CPLEX> quit

C:\ILOG\CPLEX112\bin\x86_win32>
    
```

Figura 14: Interacción con el CPLEX.

Paso 4: Escritura del resultado en un archivo “.sol” en formato XML.

Como indica el paso anterior, mediante la instrucción *write*, el CPLEX escribe los resultados del problema en un archivo. En concreto, es un archivo con extensión “.sol” escrito en formato XML [28], como el siguiente:

```

<?xml version = "1.0" standalone="yes"?>
<CPLEXSolution version="1.2">
<header
  problemName="output.lp"
  solutionName="incumbent"
  solutionIndex="-1"
  objectiveValue="145"
  solutionTypeValue="3"
  solutionTypeString="primal"
  solutionStatusValue="101"
  solutionStatusString="integer optimal solution"
  solutionMethodString="mip"
  primalFeasible="1"
  dualFeasible="1"
  MIPNodes="0"
  MIPIterations="1"
  writeLevel="1"/>
<quality
  epInt="1e-05"
  epRHS="1e-06"
  maxIntInfeas="0"
  maxPrimalInfeas="0"
  maxX="1"
  maxSlack="0"/>
<linearConstraints>
<constraint name="c1" index="0" slack="0"/>
</linearConstraints>
<variables>
<variable name="X1" index="0" value="1"/>
<variable name="X2" index="1" value="1"/>
<variable name="X3" index="2" value="0"/>
</variables>
</CPLEXSolution>

```

El lenguaje de marcas extensible (XML - *Extensible Markup Language*) es un formato simple basado en texto para representar estructuras de información de manera estructurada, es decir, de la forma más abstracta y reutilizable posible. Que la información sea estructurada significa que se compone de partes bien definidas, y que esas partes se componen a su vez de otras partes. Por lo tanto, es como tener un árbol con pedazos de información.

Paso 5: Interpretación de los resultados en matrices de Matlab.

Del archivo con formato XML generado por el CPLEX nos tenemos que quedar con la parte:

```

<variable name="X1" index="0" value="1"/>
<variable name="X2" index="1" value="1"/>
<variable name="X3" index="2" value="0"/>

```

en la que se encuentran las variables y sus respectivos valores. Para realizar dicha tarea, se hace uso de archivo “parse” creado en Matlab que se va introduciendo por las distintas secciones del archivo hasta encontrar la palabra “*variable*”. Una vez

posicionados en esa parte de información, se va guardando en un vector 'x' los valores de todas las variables del problema.

Por tanto, para este ejemplo, el vector 'x' vendría dado por:

$$\boxed{\begin{matrix} x = [& 1 \\ & 1 \\ & 0] ; \end{matrix}} \quad \text{lo cual significaría } \Rightarrow \quad \boxed{\begin{matrix} x_1 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_3 = 0 \end{matrix}}$$

Introduciendo estos valores en la función objetivo (que como recordamos era: maximizar $65X_1 + 80X_2 + 30X_3$), el valor obtenido es $65 + 80 = 145$.

3.3 Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica

El problema consiste en encontrar los caminos para cada *lightpath* que consigan obtener una distribución óptima de la carga en la red dada una topología y una demanda de circuitos ópticos. Para ello, nos vamos a basar en los algoritmos presentados en el documento [22]. Un aspecto de diseño es que cada demanda se trata de forma independiente, es decir, si entre dos nodos hay una demanda de tres circuitos ópticos, no se encaminan esos tres circuitos por la misma ruta.

Al plantear el problema como un ILP, el objetivo a conseguir es minimizar el número de circuitos que atraviesa el enlace más cargado, denotado por F_{\max} , y como variables para llevar a cabo el problema se ha definido una por cada enlace de la red y por cada circuito, denotadas por F_{ij}^{ksd} que determinarán si un determinado *lightpath* 'k' de una demanda entre dos nodos 'sd' se encamina o no por el enlace 'ij'.

De esta forma, para planificar las rutas de trabajo de un conjunto de demandas de tráfico, sin tener en cuenta ni los caminos de protección ni las restricciones físicas, se plantea el siguiente problema ILP:

Datos de entrada:

k_{sd} , es el índice que identifica el número de *lightpath* del nodo origen 's' al nodo destino 'd'.

Variables:

F_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico el *lightpath* de 's' a 'd' se encamina por el link 'ij' (si $F_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $F_{ij}^{ksd} = 0$). Como se puede observar, se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores '0' y '1'.

F_{\max} , número de circuitos que pasan por el enlace más cargado. Se trata de una variable entera positiva cuyo valor máximo es el número de circuitos totales.

Objetivo:

Minimizar: F_{\max}

Restricciones:

La restricción (3.1) indica que el número de circuitos que hay en el enlace más cargado tiene que ser mayor o igual al número de circuitos en el resto de los enlaces de la red. Esta restricción se repite para cada enlace.

$$F_{max} \geq \sum_k F_{ij}^{ksd} \quad \forall i, j \quad (3.1)$$

La restricción (3.2) impone la continuidad del *lightpath* en el camino desde el nodo origen hasta el nodo destino. Esta restricción se construye para cada nodo y para cada *lightpath* de tal forma que si nos encontramos en un nodo origen del *lightpath*, la suma de las variables que representan los enlaces de salida de dicho nodo tiene que ser ‘-1’; si por el contrario, el nodo es el destino, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes a dicho nodo, tiene que ser ‘+1’; y finalmente si el nodo es intermedio, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes y salientes de dicho nodo tiene que ser ‘0’, es decir que si hay una entrante cuyo valor es ‘1’ entonces tiene que haber una saliente cuyo valor sea ‘1’ también.

$$\sum_i F_{ij}^{ksd} - \sum_m F_{jm}^{ksd} = \begin{cases} -1 & \text{si } s = j \\ 1 & \text{si } d = j \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad \forall k, \quad \forall j \quad (3.2)$$

La restricción (3.3) impide que se generen bucles durante el camino. Si la solución del problema contiene un camino en el que se repite un nodo varias veces (bucle) es debido a que esa solución no empeora el valor de la función objetivo, pero sin embargo se consumen recursos de la red innecesariamente, se aumenta la distancia del recorrido de la señal, etc., que supone un comportamiento no deseable para la red de un operador. Como se ha definido en (3.2), siempre que un *lightpath* entre a un nodo intermedio tiene que salir; sin embargo no impide que el *lightpath* entre y salga en más de una ocasión (bucle). Por tanto, (3.3) obliga que la suma de todos los que entran y salen sea menor o igual que dos, es decir, que el *lightpath* sólo pase por dicho nodo una sola vez.

$$\sum_i F_{ij}^{ksd} + \sum_m F_{jm}^{ksd} \leq 2 \quad \forall k, \quad \forall j \quad (3.3)$$

3.2.2 Procesado del resultado en Matlab

A diferencia de los dos ejemplos simples que se mostraron anteriormente, para el caso de una red real el paso 5 (Interpretación de los resultados en matrices de Matlab) es distinto y más complejo. Aparte de obtener los valores de las variables mediante la función “parse” hay que ir evaluando *lightpath* a *lightpath* para determinar el camino que se ha asignado a partir de las variables cuyo valor es ‘1’, que indica que el determinado enlace forma parte de la ruta. Para una interpretación sencilla de la solución del problema, las matrices creadas en Matlab son:

- **Caminos por enlaces:** Matriz de tamaño (número de circuitos x número de enlaces) en la que la columna representa a cada enlace y la fila a cada circuito. Si en una determinada posición hay un ‘1’ quiere decir que el circuito pasa por

el enlace indicado por la columna de dicha posición. Además esta matriz es de gran utilidad puesto que nos da la ocupación por enlace con el mero hecho de ir sumando por columnas el número de ‘unos’ existentes.

Tabla 6: Matriz caminos de trabajo por enlaces.

Caminos por enlaces		Enlaces															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lightpaths	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

De esta matriz podemos deducir que el camino del primer *lightpath* va consistir en el enlace número 3 (que será aquel que se encuentre en la tercera posición de la matriz que define los enlaces de la red estudiada), puesto que hay un ‘1’ en la tercera posición de caminos por enlaces. El segundo *lightpath* atravesará el enlace 1, el 7 y el 13. Y por último, el tercer *lightpath* se encamina por el enlace 5, el 10 y el 15.

- **Caminos por nodos:** Matriz de tamaño (número de circuitos x número de nodos) en la que la columna representa a cada nodo y la fila a cada circuito. Si en una determinada posición hay un ‘1’ quiere decir que el circuito pasa por el nodo indicado por la columna de dicha posición.

Tabla 7: Matriz caminos de trabajo por nodos.

Caminos por nodos		Nodos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lightpaths	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1

De esta matriz podemos deducir que el primer camino atraviesa los nodos 1 y 2, puesto que hay un ‘1’ en la primera y segunda posición de la matriz. El segundo *lightpath* atravesará los nodos 1, 5, 7 y 8. Y por último, el tercer *lightpath* se encamina por los nodos 4, 6, 10 y 12.

- **Ruta nodos ids:** Matriz que presenta en cada fila los identificadores de los nodos por los que atraviesa cada *lightpath*. Las matrices anteriores no muestran el orden de los nodos. Ruta nodos ids es más interpretable puesto que representa el camino por orden, desde el nodo origen al nodo destino.

Tabla 8: Matriz ruta de trabajo nodos ids.

Ruta nodos ids		Nodos ids											
Lightpaths	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	5	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	10	4	6	12	0	0	0	0	0	0	0	0

Esta matriz nos muestra directamente los identificadores de los nodos que forman parte de la ruta de cada *lightpath*. Los ‘ceros’ no identifican a ningún nodo y por lo tanto no forman parte del camino, se necesita para definir la matriz ya que no se sabe a priori el número máximo de nodos de los que va a consistir una ruta.

4

Optimización de caminos teniendo en cuenta supervivencia en la red

4.1 Supervivencia en red fotónica

Para garantizar la supervivencia de una red óptica en caso de fallo de alguno de los elementos (en este proyecto sólo se estudia el fallo de enlaces) existen dos aproximaciones principales: protección y restauración [29]. En condiciones normales, el tráfico se transmite por el denominado “camino de trabajo”. En caso de fallo en la red, el tráfico se enviará por un camino alternativo, denominado “camino de supervivencia”. La primera de las aproximaciones, la protección, consiste en tener dos caminos (el de trabajo y el de supervivencia) calculados y establecidos mientras que la restauración consiste en calcular un camino de supervivencia para cada circuito afectado en el momento del fallo.

Existen diversos mecanismos de protección, pero aquí nos centraremos en la protección 1+1 dedicada, que consiste en tener disponibles y establecidos dos caminos disjuntos en enlaces y en nodos para cada demanda de tráfico. De hecho, tanto en el nodo origen como en el nodo destino, habrá dos transpondedores, uno correspondiente a la ruta de trabajo y otro a la de supervivencia como se puede observar en la Figura 15 a la izquierda. Es importante destacar que este mecanismo de protección sólo sobrevive ante casos de fallo simple. Se puede encontrar un ejemplo de algoritmo heurístico de protección 1+1 en [30] y en [31] abordan el problema mediante un ILP multifibra.

Alternativamente, si se ha optado por el mecanismo de restauración, en el momento en el que ocurre un fallo en la red, los sistemas de control tienen que detectar el lugar en el que se ha producido y comunicarlo. A continuación se comprueba los *lightpaths* que se han visto afectados por dicho fallo, se procede a calcular una nueva ruta para ellos que evite el elemento de fallo y se establece el circuito por dicha ruta. Este funcionamiento se realiza en tiempo real y sólo requiere un transpondedor en el nodo origen y otro en el nodo destino como se puede observar en la Figura 15 a la

derecha. Los algoritmos de restauración que se van a presentar en este capítulo y que modelan esta situación permiten realizar un dimensionado de la red. En [32] presentan un algoritmo heurístico para llevar a cabo el protocolo de restauración. En la literatura se encuentran, sobre todo, documentos que tratan de localizar los fallos [33] [34], monitorizar la red y restaurar los caminos mediante algoritmos de gran complejidad [35]. Sin embargo, los ILPs que se presentan a continuación son computacionalmente simples.

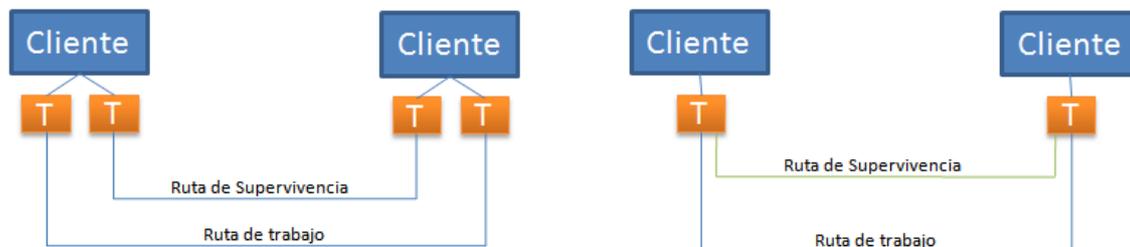


Figura 15: Protección 1+1 dedicada (izquierda) y restauración (derecha).

4.2 Algoritmos de planificación para supervivencia de red mediante el esquema de protección 1+1

Para el caso de la protección 1+1 se han implementado varias técnicas que se explican a continuación. En el primer método, denominado “Camino Disjunto”, sólo se optimizan los caminos de supervivencia mientras que en el segundo, “Optimización Conjunta” se optimizan tanto los caminos de trabajo como los de supervivencia.

4.2.1 Método del Camino Disjunto

El problema consiste en el cálculo óptimo de los caminos de supervivencia dado un conjunto de rutas de trabajo. Para llevar a cabo este método se parte de las rutas de trabajo previamente calculadas por un algoritmo genérico. Considerando a título de ejemplo la red de la Figura 16, el algoritmo tiene en cuenta los caminos de trabajo ya establecidos, como puede ser el camino representado por la línea continua de color rojo por el que se transmite la señal entre el nodo origen y el nodo destino.

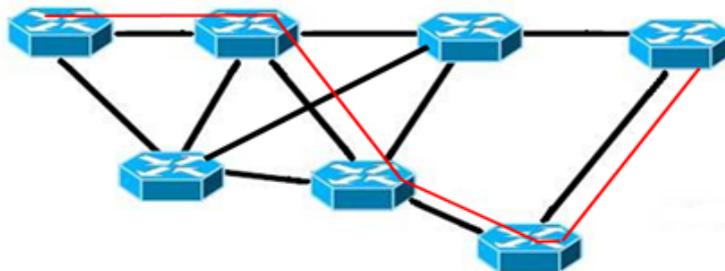


Figura 16: Punto de partida (ruta de trabajo).

Para obtener el conjunto óptimo de caminos de supervivencia, se toma como punto de partida el ILP descrito en el capítulo 3.3 **Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica** pero en esta ocasión se eliminan los enlaces por los que pasa la ruta de trabajo para que ambos caminos sean disjuntos en enlaces, es decir, que las dos rutas nunca compartan un mismo enlace. Esto se puede llevar a cabo porque las rutas de trabajo son conocidas. El resultado del ILP dará el conjunto de enlaces correspondientes a la ruta de supervivencia (como por ejemplo puede ser la línea discontinua de color azul en la Figura 17 dada la ruta de trabajo de la Figura 16).

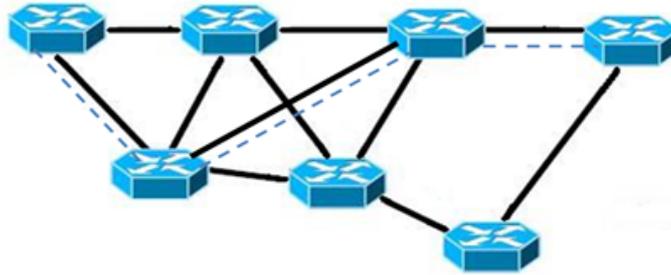


Figura 17: Solución del método (ruta de supervivencia disjunta de la de trabajo).

Datos de entrada:

k_{sd} , es el índice que identifica el número de *lightpath* del nodo origen ‘s’ al nodo destino ‘d’.

NI_k , es el conjunto de nodos intermedios para cada demanda ‘k’, es decir, todos los nodos de la red excluyendo el nodo origen y el nodo destino de dicho *lightpath*.

F_{ij}^{ksd} , variable que indica la cantidad de circuitos de ‘s’ a ‘d’ que se encamina por el link ‘ij’ (si $F_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $F_{ij}^{ksd} = 0$). En este caso se tratan de valores conocidos.

Variables:

B_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico la ruta de supervivencia del *lightpath* ‘k’ que va de ‘s’ a ‘d’ se encamina por el link ‘ij’ (si $B_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $B_{ij}^{ksd} = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores ‘0’ y ‘1’.

F_{max} , número de conexiones que pasan por el enlace más cargado. Se trata de una variable entera positiva cuyo valor máximo es el número de circuitos totales.

Objetivo:

Minimizar: F_{max}

Restricciones:

La restricción (4.1) indica que el número de circuitos que hay en el enlace más cargado tiene que ser mayor o igual al número de circuitos en el resto de los enlaces de la red, contando tanto los caminos de supervivencia como los de trabajo. El término

correspondiente a los caminos de trabajo se utiliza para que el ILP tenga en cuenta el número de caminos que ya hay previamente establecidos, es decir, los valores de F_{ij}^{ksd} son conocidos. Esta restricción se repite para cada enlace.

$$F_{max} \geq \sum_k F_{ij}^{ksd} + \sum_k B_{ij}^{ksd} \quad \forall i, j \quad (4.1)$$

La restricción (4.2) define la continuidad del *lightpath* en el camino desde el nodo origen hasta el nodo destino. Esta restricción se construye para cada nodo y para cada *lightpath* de tal forma que si nos encontramos en un nodo origen del *lightpath*, la suma de las variables que representan el enlace de salida de dicho nodo tiene que ser ‘-1’; si por el contrario, el nodo es el destino, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes a dicho nodo, tiene que ser ‘+1’; y finalmente si el nodo es intermedio, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes y salientes de dicho nodo tiene que ser ‘0’, es decir que si hay una entrante cuyo valor es ‘1’ entonces tiene que haber una saliente cuyo valor sea ‘1’ también.

$$\sum_i B_{ij}^{ksd} - \sum_m B_{jm}^{ksd} = \begin{cases} -1 & \text{si } s = j \\ 1 & \text{si } d = j \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad \forall k, \quad \forall j \quad (4.2)$$

Las siguientes restricciones, a las que llamaremos “*restricciones de enlaces*”, impiden que los caminos de protección salgan del nodo origen por el mismo enlace que el camino de trabajo (4.3) y que entren por el mismo enlace que el camino de trabajo al nodo destino (4.4). Se plantean para el nodo origen y destino de cada *lightpath*.

$$B_{sj}^{ksd} = 0 \quad \text{si } F_{sj}^{ksd} = 1 \quad \forall k \quad (4.3)$$

$$B_{id}^{ksd} = 0 \quad \text{si } F_{id}^{ksd} = 1 \quad \forall k \quad (4.4)$$

Las restricción (4.5) será la “*restricción de nodos*” y fuerza a que los caminos de protección sean disjuntos en nodos con los caminos de trabajo. Se plantea para todos los nodos que no son ni origen ni destino de cada demanda, es decir, los que se denominan nodos intermedios. Si un nodo intermedio está siendo usado por la ruta de trabajo, entonces todas las variables que corresponden con los enlaces que entran y salen de dicho nodo son ‘0’.

$$B_{ij}^{ksd} = 0 \quad \text{si } \sum_m F_{mj}^{ksd} \geq 1 \quad \forall k, \quad \forall ij \mid j \in NI_k \quad (4.5)$$

4.2.2 Método de Optimización Conjunta

El problema consiste en calcular a partir de una topología de red y un conjunto de demandas de circuitos, una ruta de trabajo y una ruta de supervivencia disjunta a la de trabajo, de forma que en conjunto optimicen un determinado criterio.

A diferencia del mecanismo anterior, en el cual partíamos de las rutas de trabajo conocidas y posteriormente optimizábamos las de supervivencia, en este caso plateamos el problema conjuntamente, es decir, en la solución del algoritmo de optimización se obtiene simultáneamente el conjunto más óptimo de enlaces que atraviesa la ruta de

trabajo y el de enlaces que atraviesa la ruta de supervivencia, considerando aquí también que ambos caminos (de trabajo y supervivencia) son disjuntos y por lo tanto no comparten enlaces ni nodos.

Computacionalmente este proceso es más complejo debido a que el número de variables que forman el problema es el doble, pero a cambio se logra una mejor optimización de la carga de la red.

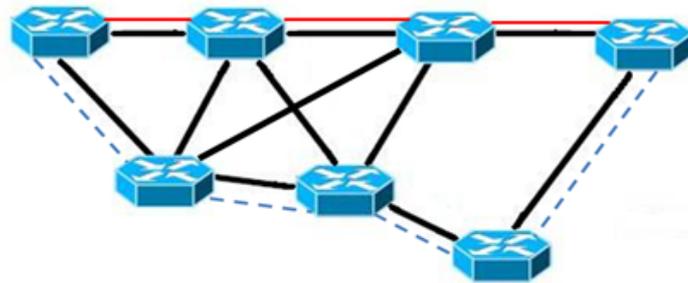


Figura 18: Ejemplo de optimización conjunta.

Datos de entrada:

k_{sd} , es el índice que identifica el número de *lightpath* del nodo origen ‘s’ al nodo destino ‘d’.

Variables:

F_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico de la ruta de trabajo del *lightpath* ‘k’ que va de ‘s’ a ‘d’ se encamina por el link ‘ij’ (si $F_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $F_{ij}^{ksd} = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores ‘0’ y ‘1’.

B_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico de la ruta de supervivencia del *lightpath* ‘k’ que va de se encamina por el link ‘ij’ (si $B_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $B_{ij}^{ksd} = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores ‘0’ y ‘1’.

F_{max} , número de conexiones que pasan por el enlace más cargado. Se trata de una variable entera positiva cuyo valor máximo es el número de circuitos totales.

Objetivo:

Minimizar: F_{max}

Restricciones:

La restricción (4.6) indica que el número de circuitos que hay en el enlace más cargado tiene que ser mayor o igual al número de circuitos en el resto de los enlaces de la red, sumando tanto los circuitos de trabajo como los de protección.

$$F_{max} \geq \sum_k F_{ij}^{ksd} + \sum_k B_{ij}^{ksd} \quad \forall i, j \quad (4.6)$$

Las siguientes restricciones definen la continuidad del *lightpath* en el camino desde el nodo origen hasta el nodo destino. La restricción (4.7) lo define en los caminos de trabajo mientras que la (4.8) hace lo mismo para los caminos de protección. Estas restricciones se construyen para cada nodo y para cada *lightpath* de tal forma que si nos encontramos en un nodo origen del *lightpath*, la suma de las variables que representan el enlace de salida de dicho nodo tiene que ser '-1'; si por el contrario, el nodo es el destino, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes a dicho nodo, tiene que ser '+1'; y finalmente si el nodo es intermedio, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes y salientes de dicho nodo tiene que ser '0', es decir que si hay una entrante cuyo valor es '1' entonces tiene que haber una saliente cuyo valor sea '1' también.

$$\sum_i F_{ij}^{ksd} - \sum_m F_{jm}^{ksd} = \begin{cases} -1 & \text{si } s = j \\ 1 & \text{si } d = j \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad \forall k, \quad \forall j \quad (4.7)$$

$$\sum_i B_{ij}^{ksd} - \sum_m B_{jm}^{ksd} = \begin{cases} -1 & \text{si } s = j \\ 1 & \text{si } d = j \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad \forall k, \quad \forall j \quad (4.8)$$

Las siguientes restricciones son las que exigen que los caminos de trabajo y los de supervivencia sean disjuntos en enlaces cuando estamos tratando con el nodo origen (4.9) y con el nodo destino (4.10), haciendo que la suma de las variables que corresponden a un mismo enlace sea como máximo 1, es decir, sólo una de las rutas va a pasar por un enlace.

$$F_{sj}^{ksd} + B_{sj}^{ksd} \leq 1 \quad \forall k, \quad \forall j \quad (4.9)$$

$$F_{jd}^{ksd} + B_{jd}^{ksd} \leq 1 \quad \forall k, \quad \forall j \quad (4.10)$$

Por otro lado, con la restricción (4.11) hacemos que las rutas sean disjuntas en nodos para los nodos intermedios de una determinada demanda, obligando a que la suma de las variables correspondientes a las dos rutas y que representan los enlaces que entran a dicho nodo sea menor o igual que 1, de esa forma sólo una de las variables podrá tomar valor 1.

$$\sum_m B_{mj}^{ksd} + \sum_m F_{mj}^{ksd} \leq 1 \quad \forall k, \quad \forall j \mid j \in NI_k \quad (4.11)$$

4.3 Algoritmos de planificación para supervivencia de red mediante el esquema de restauración

El problema consiste en calcular, dado un conjunto de rutas de trabajo, el conjunto óptimo de rutas de restauración de los *lightpaths* que se han visto afectados por un fallo teniendo en cuenta el estado de la red en ese instante. Para ello se define como caso de fallo la caída de un enlace y por tanto, todos los canales (longitudes de onda) que forman parte de él.

Dado que el ámbito del proyecto es la planificación de red, el procedimiento a seguir es el cálculo de las rutas de restauración para cada caso de fallo simulado. La estrategia a seguir es la siguiente: se va considerando en cada iteración un fallo hasta recorrer todos los fallos que puedan ocurrir en la red, en cada iteración se comprueban cuáles son los *lightpaths* que se ven afectados por dicho fallo y se formula el problema de programación lineal sólo para dichos *lightpaths*, pero teniendo en cuenta el estado actual de la red, esto es, las rutas de trabajo de los *lightpaths* que no se han visto afectados por el fallo.

El algoritmo ILP de restauración propuesto sirve tanto para fallos simples como para fallos dobles, lo que significa que en cada iteración se caen uno y dos enlaces respectivamente, y se plantea independientemente para cada caso de fallo, es decir, en cada iteración se generará un ILP nuevo y distinto de todos los demás.

Datos de entrada:

k_{sd} , es el índice que identifica el número de *lightpath* del nodo origen ‘s’ al nodo destino ‘d’.

F_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico de la ruta de trabajo del *lightpath* ‘k’ no afectado por el fallo que va de ‘s’ a ‘d’ se encamina por el link ‘ij’ (si $F_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $F_{ij}^{ksd} = 0$). En este caso se tratan de valores conocidos.

Variables:

R_{ij}^{ksd} , variable que indica que el tráfico de ‘s’ a ‘d’ de la ruta de restauración de los *lightpaths* afectados por el fallo se encamina por el link ‘ij’ (si $R_{ij}^{ksd} = 1$) o no (si $R_{ij}^{ksd} = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores ‘0’ y ‘1’.

F_{max} , número de conexiones que pasan por el enlace más cargado. Se trata de una variable entera positiva cuyo valor máximo es el número de circuitos totales.

Objetivo:

Minimizar: F_{max}

Restricciones:

La restricción (4.12) indica que el número de circuitos que hay en el enlace más cargado tiene que ser mayor o igual al número de circuitos en el resto de los enlaces de la red, sumando tanto los circuitos de trabajo no afectados por el fallo como los de restauración.

$$F_{max} \geq \sum_{s,d} R_{ij}^{ksd} + \sum_{s,d} F_{ij}^{ksd} \quad \forall i, j (\neq \text{enlace caído}) \quad (4.12)$$

La restricción (4.13) define la continuidad del *lightpath* en el camino desde el nodo origen hasta el nodo destino. Esta restricción se construye para cada nodo y para cada *lightpath* de tal forma que si nos encontramos en un nodo origen del *lightpath*, la suma de las variables que representan el enlace de salida de dicho nodo tiene que ser ‘-

1'; si por el contrario, el nodo es el destino, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes a dicho nodo, tiene que ser '+1'; y finalmente si el nodo es intermedio, la suma de las variables que representan los enlaces entrantes y salientes de dicho nodo tiene que ser '0', es decir que si hay una entrante cuyo valor es '1' entonces tiene que haber una saliente cuyo valor sea '1' también.

$$\sum_i R_{ij}^{ksd} - \sum_m R_{jm}^{ksd} = \begin{cases} -1 & \text{si } s = j \\ 1 & \text{si } d = j \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad \forall k \quad \forall j \quad (4.13)$$

4.3.1 Fallo Simple

En el problema sólo aparecen las variables correspondientes a los *lightpaths* cuyas rutas de trabajo pasaban por el enlace caído, con lo cual se resuelve fácilmente y en un tiempo de computación pequeño. El resultado que devuelve el algoritmo será el conjunto de rutas de restauración óptimas para los *lightpaths* afectados por el fallo teniendo en cuenta la distribución de las rutas de trabajo de los *lightpath* no afectados.

4.3.2 Fallo Doble

En el problema aparecen las variables correspondientes a los *lightpaths* cuyas rutas de trabajo pasaban por los dos enlaces caídos. El cómputo es un poco más complejo que en el caso de fallo simple puesto que se cuenta con más variables a resolver y por lo tanto el tiempo de cómputo será un poco mayor. Al igual que en el caso de fallo simple, el resultado que devuelve el algoritmo será el conjunto de rutas de restauración óptimas para los *lightpaths* afectados por los fallos teniendo en cuenta la distribución de las rutas de trabajo de los *lightpath* no afectados.

5

Optimización de caminos teniendo en cuenta limitaciones de la capa física

5.1 Introducción a los efectos físicos en transmisión óptica

Los primeros estudios [11] [12] [13] [14] [15] que presentaban soluciones para encaminar el tráfico por la red óptica no tenían en cuenta los problemas que el medio físico de transmisión provoca sobre las señales ópticas hasta tal punto que una parte de los *lightpaths* calculados no podrían establecerse debido a que la calidad sea inaceptable.

En la transmisión por fibra óptica hay una serie de efectos que provocan una paulatina degradación de la calidad de la señal al igual que ocurre con todo tipo de medio de transporte. Bien son conocidos por ejemplo los efectos de la atenuación. Estos efectos pueden afectar tanto a la intensidad de la señal óptica como a las características temporales, espectrales y de polarización; y se clasifican en dos tipos: lineales y no lineales. Entre los efectos lineales podemos encontrar el ruido (OSNR), la dispersión y la atenuación, y entre los no lineales están efectos relacionados con la modulación, el esparcimiento o scattering y la interferencia entre canales.

Para abordar el problema del encaminamiento y la asignación de longitud de onda (RWA) considerando las limitaciones de la capa física PLIA (*Physical Layer Impairment Aware*), se impone una de la Tasa de Error de Bit (BER) máxima en el receptor de 10^{-4} . Este parámetro puede relacionarse directamente con la OSNR, que es fácilmente medible en las redes ópticas. En la siguiente figura podemos comprobar esa relación entre la BER y la OSNR, donde también se observa que gracias a un buen código de corrección de errores (FEC – *Forward Error Correction*) los requisitos de OSNR son menos restrictivos que si no tenemos ninguno.

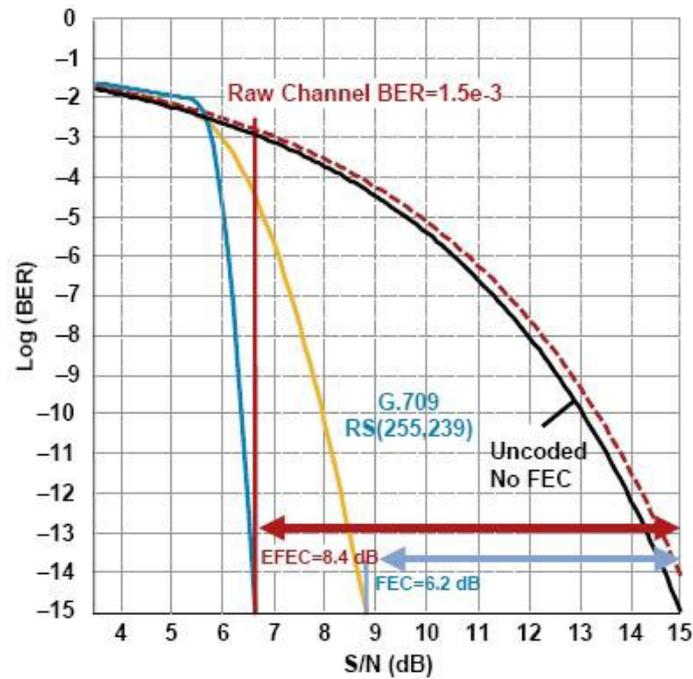


Figura 19: Relación BER – OSNR.

En este proyecto se ha llevado a cabo un amplio estudio del estado del arte de los algoritmos propuestos de encaminamiento y asignación de longitudes de onda teniendo en cuenta las restricciones físicas.

En el documento [36] se describen las tres formas posibles de introducir los efectos (quedan resumidas en la Figura 20): pueden tenerse en cuenta como una etapa independiente llevada a cabo en distintos instantes (caso-A), introducirse en la etapa de encaminamiento, de asignación de longitud de onda o en ambos procesos (caso-B), o una mezcla de ambas técnicas separando las restricciones de la verificación (caso-C).

En el presente proyecto se introducen los efectos físicos como restricciones del problema de encaminamiento definido por un ILP, por lo tanto, si tras este proceso se realizara una asignación de longitud de onda, entonces correspondería con el caso B-1 definido en [36].

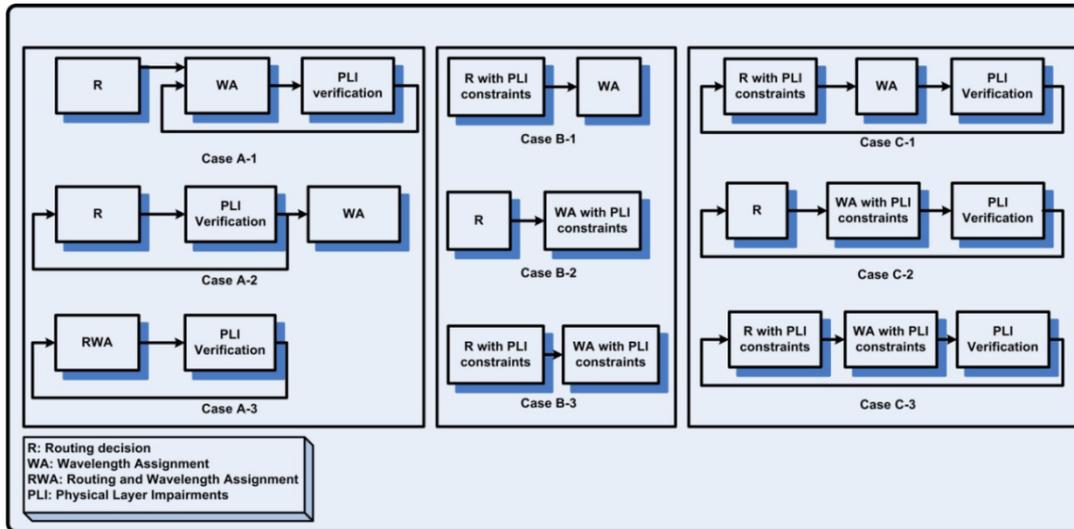


Figura 20: Métodos para considerar las restricciones físicas en el problema RWA.

Otro aspecto importante de los algoritmos es la forma de obtener los valores mediante los cuales se calculan los umbrales de los parámetros a medir, ya sea un factor de calidad (Q_{factor}) o los propios valores de los efectos físicos por separado. Se han encontrado documentos en los que se propone la obtención de dichos valores mediante simulaciones [37] (como por ejemplo puede ser la herramienta de simulación VPI), mediante monitorización directa de la red [38] o formulación [39].

También existen en la literatura muchos algoritmos dirigidos al encaminamiento de tráfico dinámico (tiempo real) que no consideramos en este proyecto puesto que estamos haciendo un estudio de la planificación (tráfico estático).

Los algoritmos RWA que consideran el impacto de las restricciones físicas han sido en los últimos años el objetivo de un intenso estudio. Aunque no existe una conclusión común, la regeneración es necesaria. En la literatura, la regeneración se conoce como 3R [40] debido a que los dispositivos con capacidades regenerativas realizan una re-amplificación, re-formado y re-timing a los pulsos ópticos.

En cuanto a los estudios de planificación algunos se centran en realizar una búsqueda del emplazamiento óptimo de los nodos con regeneración como por ejemplo en [41], cuyo objetivo es minimizar el número de regeneradores y al mismo tiempo maximizar el número de conexiones establecidas. Otro grupo deciden dividir la red en varias islas de transparencia, donde un *lightpath* puede alcanzar otro nodo de la misma isla sin necesidad de regeneración como en [42] y en [20] formulando el problema como un grafo.

Pero la aproximación que tiene más seguidores es la que define una longitud o número de vanos máximos que la señal puede atravesar. Esa distancia máxima es la que satisface los umbrales de todos o casi todos los parámetros físicos [43] [44]. Como se verá en siguientes apartados, el algoritmo ILP propuesto en este proyecto para considerar los efectos físicos, es distinto a todos los anteriores trabajos realizados por calcular la OSNR y la PMD de cada camino de forma independiente, por considerar ubicación fija de regeneradores, por tratar los caminos en dos tramos, por no bloquear

ninguna demanda y por mantener el objetivo del problema como la minimización del número de circuitos en el enlace más cargado.

Para poder entender mejor su planteamiento, a continuación se describen los efectos físicos más importantes, se presentan las conclusiones a las que se han llegado y la forma de tener en cuenta los parámetros elegidos para el problema de encaminamiento teniendo en cuenta las restricciones físicas basado en formulación ILP.

5.1.1 Relación Señal a Ruido

El OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) es el parámetro fundamental en redes ópticas desde el cual se deduce la Tasa de Error de Bit (BER – *Bit Error Rate*). Valores del OSNR por debajo de un determinado umbral producen una degradación de la señal deseada y se puede obtener como la relación entre el nivel de potencia y el nivel de ruido [45].

$$OSNR(dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

siendo, P_{signal} la potencia de la señal deseada y P_{noise} la potencia de la señal de ruido.

Fuentes de ruido pueden ser, entre otras:

- Los transmisores.
- El *crosstalk* entre canales.
- La emisión espontánea de ruido (ASE) proveniente de los amplificadores dopados de fibra de Erblio (EDFAs).

Por citar un ejemplo, en el documento [46] las restricciones son introducidas a nivel de encaminamiento y una vez que el camino se ha escogido, se asigna una longitud de onda que tenga un rango de dispersión aceptable y que contribuya a disminuir la probabilidad de bloqueo de las futuras conexiones.

En dicho documento, el parámetro OSNR es debido al ASE, que en general sigue la siguiente ecuación:

$$P_{ase} = F \cdot h \cdot \nu \cdot (G - 1) \cdot B_0$$

siendo G la ganancia del amplificador, h la constante de Plank, F la figura de ruido, ν la frecuencia de transmisión y B_0 el ancho de banda óptico.

Además, definen la potencia de ruido ASE total y la potencia de la señal después de k enlaces:

$$P_{ase}(k) = P_{ase}(k - 1) \cdot L_f(k) \cdot G_{EDFA}(k) + P_{ase}(k)$$

$$P_{sig}(k) = P_{sig}(k - 1) \cdot L_f(k) \cdot G_{EDFA}(k)$$

Con $L_f(k)$ y $G_{EDFA}(k)$, pérdidas de la fibra y ganancia de amplificadores del enlace k respectivamente. Calculan el OSNR en el último de los tramos como:

$$OSNR_{system} = \frac{P_{sig}(M)}{P_{ase}(M)}$$

Y por último definen el OSNR en el receptor:

$$(OSNR_{rcvd})^{-1} = (OSNR_{in} + OSNR_{system})^{-1}$$

Consideran que una conexión será rechazada si su $OSNR_{rcvd}$ es menor que el $OSNR_{Threshold}$.

En la siguiente figura se puede apreciar el efecto del ruido sobre la potencia de la señal.

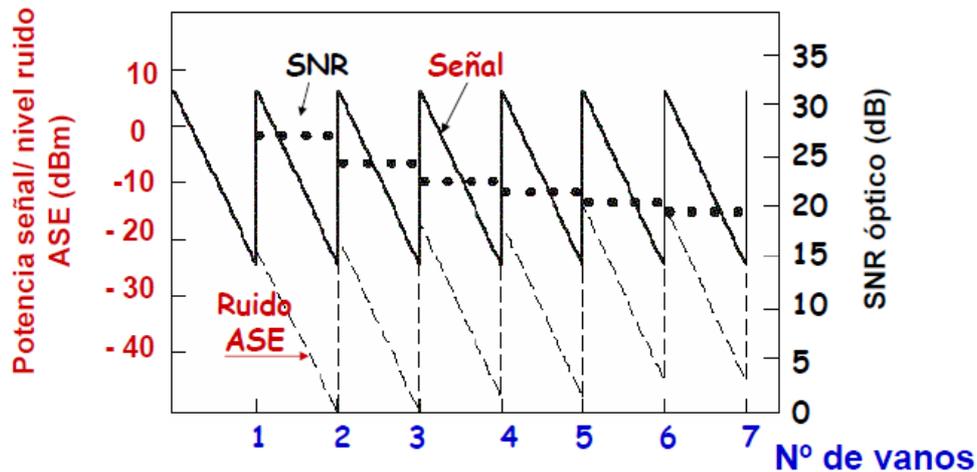


Figura 21: Efecto de la OSNR sobre la potencia de una señal.

5.1.2 Dispersión por modo de polarización

La PMD (*Polarization Mode Dispersion*) se produce debido a que las componentes ortogonales, que determinan el estado de polarización de cada modo, viajan por la fibra con diferentes velocidades de grupo causando el ensanchamiento de los impulsos ópticos. Este fenómeno se produce debido a las imperfecciones y asimetrías de la propia fibra óptica en el proceso de fabricación. El valor de PMD viene dado por la siguiente fórmula [47]:

$$D_{PMD} \left(\frac{ps}{\sqrt{km}} \right) = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}}$$

donde $\Delta\tau$ es el tiempo diferencial de grupo (DGD - *Diferencial Group Delay*) y L es la longitud por la que se ha propagado la señal.

Se expresa en $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ y su magnitud varía entre 0,1 y 10 $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$. En nuestro caso, lo tomaremos como un valor por enlace ($0,1 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$) y se irá acumulando a lo largo del camino. Al llegar al destino tendremos la contribución de todos los enlaces por los que ha pasado el circuito. En general, los requerimientos de PMD no son un problema para la mayoría de los tipos de fibra a tasas menores de 10Gbps, pero sí lo es para tasas mayores.

En [48] definen un modelo de PMD de tal forma que calculan la PMD de un enlace como:

$$PMD_{link} = \sqrt{\sum_{f \in \text{fiber-spans}} (PMD(f)^2)}$$

Y la de un camino entero como:

$$PMD_{path} = \sqrt{\sum_{f \in \text{fiber links of the route}} (PMD(f)^2)}$$

En la Figura 22 se puede apreciar el efecto que produce la PMD sobre las señales.

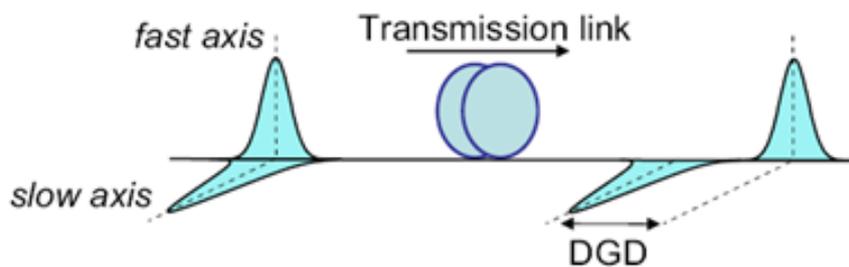


Figura 22: Efecto de la PMD sobre la señal.

5.1.3 Dispersión cromática

CD (*Chromatic Dispersion*) es el término usado para describir la variación del índice de refracción de un medio óptico con la longitud de onda. Viene dada por la siguiente fórmula:

$$CD \left(\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d^2 \lambda}$$

siendo λ la longitud de onda, c la velocidad de la luz y n el índice de refracción del medio.

La Dispersión Cromática provoca la reducción de la energía del pulso y que éste se extienda provocando Interferencia entre Símbolos (ISI). La causa de este fenómeno es que la velocidad de un rayo de luz depende de su longitud de onda.

Otro factor a tener en cuenta acerca de la dispersión es que se puede compensar mediante tramos de fibras compensadoras de dispersión (DCF) las cuales presentan un coeficiente de signo contrario a la dispersión de la fibra estándar. Sin embargo mediante este procedimiento de compensación de la dispersión, unas longitudes de onda pueden sobre-compensarse mientras que otras pueden sub-compensarse, debido a que en ocasiones es imposible encontrar un DCF que compense exactamente toda la CD introducida por la fibra.

Este efecto introduce lo que es conocido como dispersión residual (RD). Conociendo las características de la fibra y del módulo DCF, la dispersión residual se puede conocer con suficiente grado de precisión. Para nuestro estudio, por simplificación, utilizaremos un valor de $CD = 20 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$.

Siguiendo con el documento [46], el valor umbral de la dispersión cromática para tasas de 10 y 40 Gbps se calcula como:

$$CD_{Threshold} = \frac{k}{B^2}$$

donde k es una constante de valor 100000 y B es la tasa de bit. También se necesita el valor de la dispersión residual, que viene dada por:

$$RD_{\lambda n} = D_{\lambda n}(SMF) \cdot SMFLength + D_{\lambda n}(DCF) \cdot DCFLength$$

$D_{\lambda n}$ es el coeficiente de dispersión de la longitud de onda n -ésima y $SMF Length$ y $DCF Length$, la longitud de la fibra SMF (*Single Mode Fibers*) y DCF respectivamente.

El RD total acumulado no puede ser mayor que el umbral del CD:

$$\sum_{i,k \in P} d_{i,k} \cdot |RD(j)| \leq CD_{Threshold}$$

En la siguiente figura se puede apreciar el efecto que provoca la CD sobre las señales.

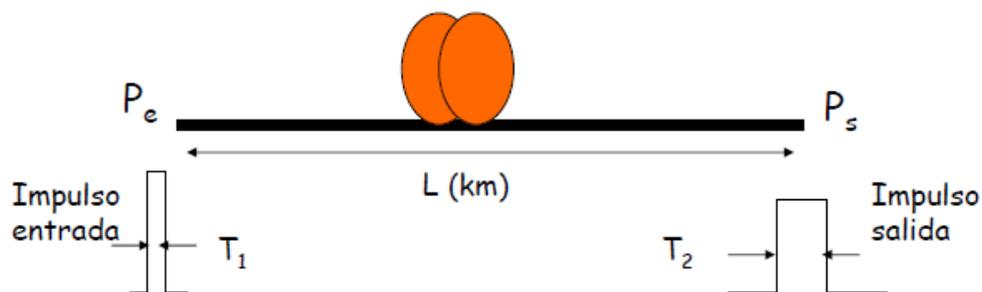


Figura 23: Efecto de la CD sobre la señal.

5.1.4 No linealidades

Entre los efectos no lineales se puede mencionar:

- *Self Phase Modulation* (SPM): el índice de refracción de la fibra varía debido al efecto Kerr, lo que produce un cambio de fase en la señal.
- *Cross Phase Modulation* (XPM): el efecto Kerr de una señal produce un cambio de fase en otra señal.
- *Four Wave Mixing* (FWM): consiste en la aparición de nuevas señales cuando varias señales de distintas frecuencias viajan por la fibra.
- *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS): se produce cuando la señal interactúa con variaciones de densidad dependientes del tiempo.
- *Stimulated Raman Scattering* (SRS): se produce cuando la señal interactúa con las variaciones moleculares del material.

Los diferentes tipos de fibras ópticas presentan distintas limitaciones no lineales en función de sus características, por lo tanto el tratamiento exhaustivo de las no linealidades de las fibras requiere un conocimiento en detalle de las mismas: los valores de dispersión de cada vano, el área de la superficie transversal del núcleo de la fibra y su composición, así como la tecnología de compensación de la dispersión que se aplica.

Alternativamente, podríamos asumir que el resultado de las limitaciones no lineales consiste en restar una determinada cantidad (en dB) al margen de la relación S/N requerida, lo cual produce, en definitiva, que el número de vanos se reduzca.

Para un mayor nivel de detalle de los parámetros no lineales se puede consultar [49].

5.1.5 Atenuación

La atenuación caracteriza las pérdidas que sufre la señal luminosa cuando ésta se transmite a través de una determinada longitud de fibra óptica. Su efecto principal es que limita la longitud del vano del enlace sin amplificación intermedia y se calcula mediante [50]:

$$At \left(\frac{dB}{Km} \right) = \frac{10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)}{L}$$

donde, P_s es la potencia de la señal a la salida del sistema, P_e es la potencia de la señal en la entrada del sistema y L es la longitud total que recorre la señal.

Las causas por las cuales se produce atenuación de la señal son:

- esparcimiento (*scattering*) debido a la composición del material.
- imperfecciones geométricas en el proceso de fabricación.
- absorción intrínseca del SiO_2 debido a las colas de absorción del ultravioleta e infrarrojo.
- absorción por impurezas (metales y armónicos del OH).

En la Figura 24 se puede apreciar el efecto que produce la atenuación sobre las señales.

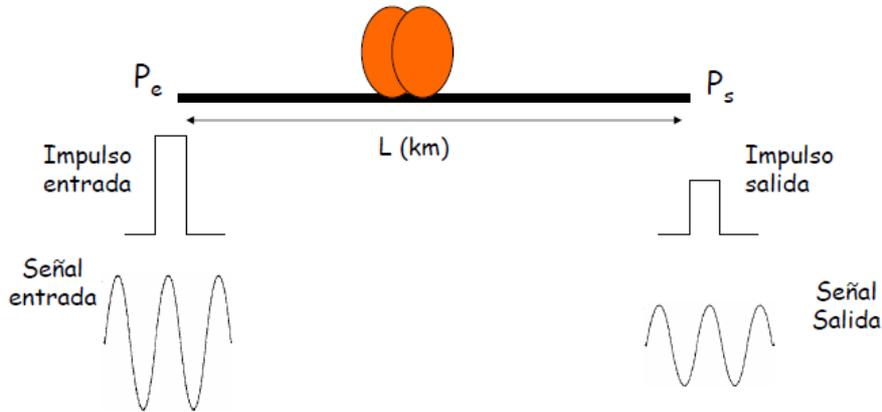


Figura 24: Efecto de la Atenuación sobre la señal.

5.1.6 El efecto negativo de la concatenación de filtros

El efecto negativo de la FC (*Filter Concatenation*) se produce debido que muchos de los componentes de un sistema DWDM que están en cascada no son filtros ideales o no están centrados en la misma frecuencia y por lo tanto el ancho de banda efectivo de la señal se va estrechando. En efecto, el ancho de banda efectivo vendrá determinado por el número de filtros por los que pasa la señal, el ancho de su banda de paso así como de su respuesta en función de la frecuencia.

De forma general, es una cuestión de diseño del sistema, por ejemplo, el sistema se diseña con una tasa de velocidad máxima usando una modulación adecuada y un determinado espaciamiento de filtros.

Para sistemas lineales, el efecto de los filtros puede considerarse como una limitación en cuanto al número máximo de éstos que pueden existir, con la condición de que sus pasos de banda son al menos tan amplios como el del receptor. Dado que tasas bajas de tráfico toleran menores anchos de banda, el número máximo de filtros que puede existir en el sistema se incrementa a medida que dicha tasa disminuye.

Se han encontrado pocos estudios en la literatura que propongan formulaciones matemáticas detalladas para modelar el efecto de la FC; generalmente se suele tomar como una penalización en la BER o el factor Q , como por ejemplo en [39].

5.1.7 Conclusiones

A modo de resumen, podemos decir que en la mayor parte de los algoritmos encontrados en la literatura se tienen en cuenta los efectos físicos de la siguiente forma:

- La atenuación no se cita en ningún documento debido a que puede ser fácilmente compensable mediante la utilización de amplificadores de ganancia.

- La PMD sólo es significativa para velocidades mayores de 40 Gbps y además, las últimas informaciones derivadas de los fabricantes hablan de un módulo compensador de la dispersión que permitiría unos valores mayores de umbrales de PMD.
- La CD es un valor por enlace que se va acumulando en cada vano, sin embargo existen módulos compensadores de dispersión (DCF) mediante los cuales la CD se hace insignificante. En cambio, todavía no está claro el efecto de la RD y la manera de tratarse.
- Las no linealidades más importantes son FWM y XPM y se tienen en cuenta sus efectos mediante una penalización en dB de la OSNR.
- Las fuentes principales de ruido son los amplificadores (ASE, *Amplifier Spontaneous Emission*) y éstos dependen del número de vanos, que es lo mismo que decir que dependen de la distancia del camino.
- Para introducir el efecto negativo que causa la FC se propone su estudio mediante simulaciones para modelarse como una penalización en dB de la OSNR.

5.2 Estructura y parámetros del sistema de comunicación considerado

La estructura básica de un sistema de comunicaciones de 80 km o menor consiste en:

- N transmisores.
- Un multiplexor.
- Un amplificador (booster).
- Un tramo de fibra SMF (*Single-Mode optical Fibre*) de 80 km.
- Un tramo de fibra compensadora de dispersión DCF (*Dispersion Compensation Fibre*).
- Un pre-amplificador.
- Un demultiplexor.
- N receptores.

En caso de que el enlace sea mayor de 80 km, se van añadiendo secciones amplificadas o vanos formados por:

- Un tramo de fibra SMF de 80 km.
- Un tramo de fibra compensadora de dispersión DCF.
- Dos amplificadores para compensar las pérdidas que se producen.

En la Figura 25 se puede ver el esquema, donde el elemento representado por un rectángulo con un punto negro en el centro determina el número de bucles o vanos por los que atraviesa el camino y que puede ir desde 0, en caso de que el enlace sea menor de 80 km, al número máximo de vanos menos uno, en caso contrario.

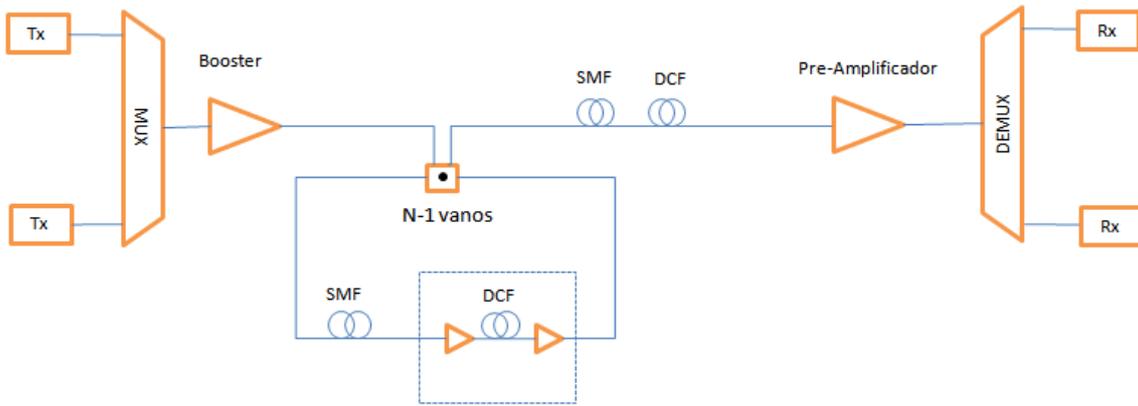


Figura 25: Esquema del sistema de comunicación considerado.

La fibra considerada es SMF G652 y tiene un factor de atenuación de 0.35 dB/km mientras que para el tramo de fibra de compensación de dispersión DCF su factor de atenuación es de 0.5 dB/km.

Los valores de la ganancia, figura de ruido y pérdidas de los elementos que constituyen el enlace básico se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9: Ganancia y Figura de ruido de cada elemento.

	G (dB)	F (dB)
Multiplexor	-3	-
Booster	16	5
Amplificador DCF	18	5
Pre-Amplificador	36	5
Demultiplexor	-3	-

Además también se fija la potencia de salida máxima por canal del booster a 2 dBm para que todos los amplificadores a lo largo del camino no se saturen, con lo cual, la potencia con la que tendrían que emitir los dispositivos láser es:

$$\begin{aligned} P_{in\ canal} &= P_{out\ canal} - G_{booster} + L_{mux} = \\ &= 2\ dBm - 16\ dB + 3\ dB = -11\ dBm \end{aligned}$$

En este sentido hay que mencionar que consideramos como que dicho amplificador presenta el denominado Control Automático de Ganancia (CAG) de tal forma que la potencia de salida por canal se mantenga constante, es decir, no debemos de tener en cuenta el efecto de tener múltiples canales.

Existe otro esquema de enlace de mayor complejidad en el que se incluyen los nodos que va atravesando la señal luminosa, esto es, los ROADMs el cual influirá en la calidad de dicha señal. Su esquema se puede apreciar en la siguiente figura.

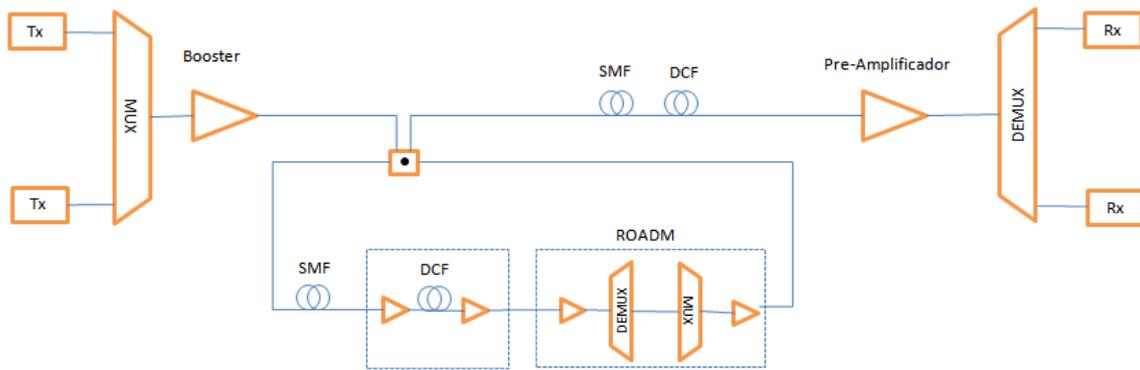


Figura 26: Esquema del sistema de comunicación considerado con ROADMs.

Aunque en la realidad el esquema que deberíamos tener en cuenta para el desarrollo del proyecto sería el esquema de enlace con ROADMs intermedios, no vamos a tener en cuenta su efecto y se propondrá en el Capítulo 7 como línea de trabajo futuro.

5.3 Cálculo de OSNR y PMD de un camino

De todos los parámetros físicos que se han descrito anteriormente, nos hemos centrado en la PMD y la OSNR puesto que los demás o se pueden compensar o simplemente se tienen en cuenta como una penalización en dB del OSNR. Por lo tanto a continuación se presenta la explicación del método seguido para calcular ambos parámetros.

Para el cálculo de la PMD de todo el camino del *lightpath* necesitamos la longitud de los enlaces puesto que el coeficiente de dispersión de las fibras viene dado en ps/\sqrt{km} . Si D_{PMD} es el coeficiente de PMD de la fibra y asumimos que es el mismo para todos los enlaces, entonces el efecto de la PMD se tiene en cuenta simplemente como un valor acumulado multiplicando el coeficiente de PMD por la raíz cuadrada de la longitud de los enlaces.

$$PMD = D_{PMD} \cdot \sqrt{L_{camino}}$$

Este valor (en ps) es el que se tiene que comparar con un umbral. Si el valor de PMD es mayor que el umbral quiere decir que la señal se ha dispersado más del máximo requerido para detectarla y procesarla correctamente en el receptor.

En cuanto al OSNR se ha simplificado el problema asumiendo que las fuentes de ruido son únicamente los amplificadores, por lo tanto la potencia de ruido dependerá del número de amplificadores por los que pasará la señal. Este número de amplificadores depende del número de vanos. Si suponemos que todos los vanos son fijos de 80 km, el número de vanos por los que atraviesa la señal es la distancia de todos los links de la ruta dividido por 80.

El número total de amplificadores que tendremos a lo largo de una ruta será:

$$2 + 2 * (N - 1)$$

El primer “2” se refiere al booster y al pre-amplificador (ver Figura 25) y la segunda parte determina el número de amplificadores de cada vano (2 amplificadores en el módulo DCF y el término “N-1” determina el número de vanos de 80 km).

Si suponemos que todos los valores vienen en dB, entonces el valor de OSNR en la entrada del receptor es:

$$OSNR = P_{señal} - P_{ruido}$$

La potencia de señal ($P_{señal}$) va a ser un valor fijo que viene determinado por el valor máximo de potencia por canal a la salida del booster ya que dicho amplificador dispone de CAG. Para determinar la potencia de la señal es necesario conocer en primer lugar la potencia de entrada al sistema que se define como:

$$P_{IN canal} = P_{OUT booster} - G_{booster} + L_{MUX}$$

donde G indica la ganancia y L las pérdidas.

Y por lo tanto la potencia de señal en el receptor viene determinada por la siguiente fórmula donde las contribuciones de los restantes elementos del enlace quedan canceladas:

$$P_{señal} = P_{IN canal} - L_{MUX} + G_{booster} - L_{DEMUX}$$

La potencia del ruido en el receptor será la suma de todas las potencias de ruido que generan los amplificadores por los que atraviesa el *lightpath*. De forma genérica y como ya se había indicado anteriormente, la potencia que genera un amplificador es:

$$p_{ASE}(mW) = f \cdot h \cdot \gamma \cdot (g - 1) \cdot b0$$

donde f es la figura de ruido, h la constante de Plank, γ la frecuencia del canal, g la ganancia y b0 el ancho de banda óptico del canal. Todos estos valores se consideran en unidades naturales. Y por tanto la potencia de ruido de todo el enlace se calcula como:

$$P_{ruido} = 10 \log_{10}(p_{ASE booster} + p_{ASE pre-amplif} + (N - 1) \cdot 2 \cdot p_{ASE DCF}) - L_{DEMUX}$$

Ya que las potencias de los amplificadores se han calculado en mW, habrá que hacerles el logaritmo para convertirlas a dB. Una vez obtenido el valor del OSNR a la entrada del receptor lo único que quedaría es compararlo con un umbral ($OSNR_{umbral}$). Para que un *lightpath* cumpla con los requisitos de calidad mínima, su OSNR tiene que ser mayor que $OSNR_{umbral}$.

A modo de recapitulación, los valores necesarios para los cálculos anteriores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10: Valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la OSNR y PMD de un *lightpath*.

Parámetro	Valor	Unidades
D_{PMD}	0.17	ps / \sqrt{km}
$P_{OUT \text{ booster}}$	2	dBm
$L_{MUX} = L_{DEMUX}$	3	dB
F	5	dB
h	$6.626e-34$	J.s
γ	$193.1e12$	Hz
$G_{booster}$	16	dB
$G_{pre-amplificador}$	36	dB
G_{DCF}	18	dB
B0 (10Gbps)	10	GHz
B0 (40Gbps)	40	GHz

5.4 Impacto de las limitaciones físicas en planificación

Se ha planificado una red genérica empleando el algoritmo del camino más corto (SP) y la técnica de encaminamiento descrita en el apartado 3.3 **Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica** pero sin tener en cuenta las limitaciones físicas. A continuación se ha procedido a calcular los valores de OSNR y PMD para todos los caminos, con el fin de mostrar la magnitud del efecto de estos parámetros físicos sobre los caminos calculados y estimar la cantidad de caminos que serían factibles si no existiese ningún nodo de regeneración mediante el cual las señales consigan llegar al receptor cumpliendo los requisitos de OSNR y PMD.

En concreto se va a ha realizado la planificación de la red para circuitos de 10 y 40 Gbps. Para 10 Gbps sólo se estudia el efecto del ruido y para 40 Gbps además el de la PMD. Las siguientes figuras muestran en el eje “y” el porcentaje de caminos que serían posibles para cada valor umbral del eje “x”.

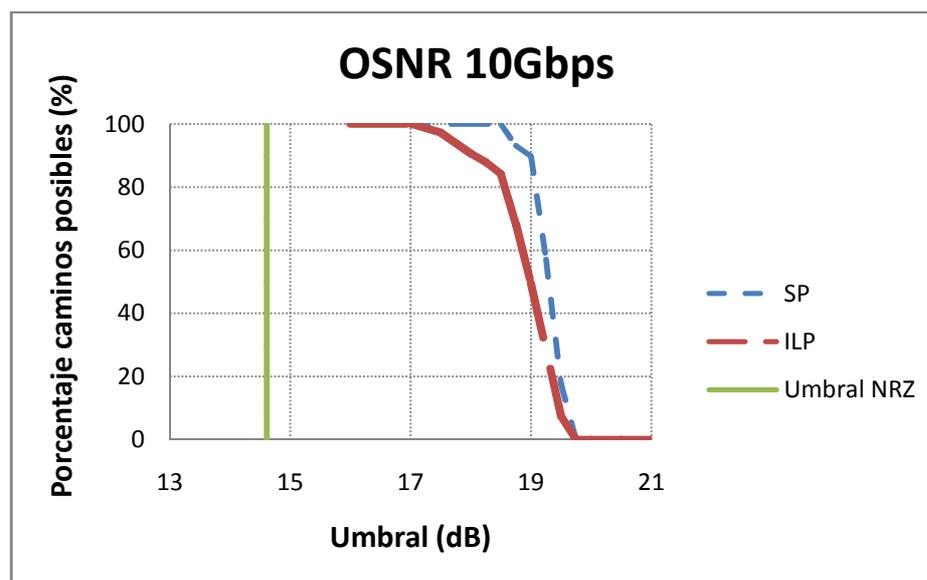


Figura 27: Porcentaje de caminos posibles frente al umbral de OSNR requerido para 10 Gbps.

Como era de esperar, para el SP el umbral es mayor debido a que todas las conexiones se van a encaminar por el camino más corto que será también el que menor OSNR tenga. Además se puede apreciar que la pendiente de la curva es mucho más brusca ya que la dispersión del número de vanos por camino será menor que para el ILP, que intenta optimizar la carga por toda la red.

En la gráfica de la Figura 27 también se muestra el umbral¹ de OSNR para un formato de modulación NRZ (línea vertical de color verde) y se observa que para dicho umbral todos los caminos serían posibles y no se requeriría el uso de regeneradores.

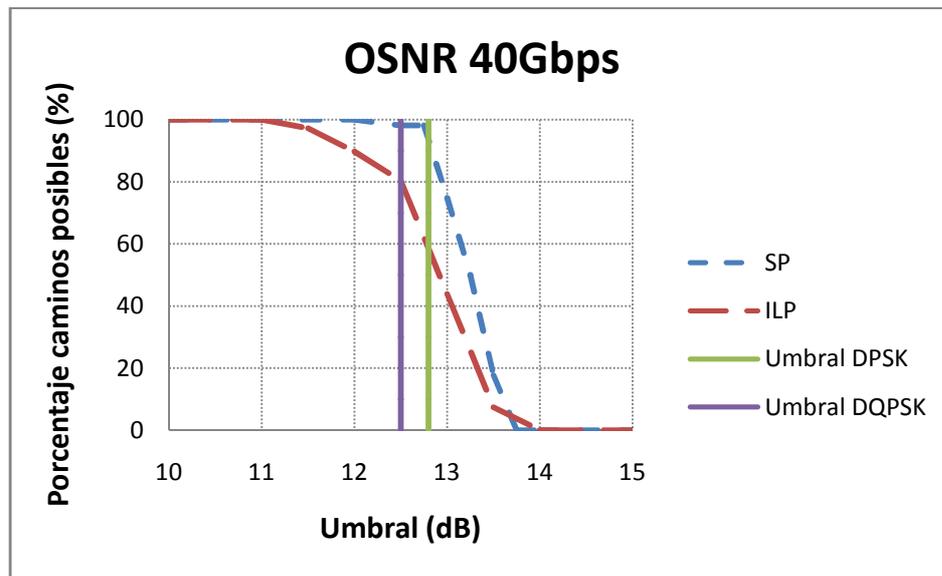


Figura 28: Porcentaje de caminos posibles frente al umbral de OSNR requerido para 40 Gbps.

Para circuitos de 40 Gbps, aparte de los efectos comentados para la Figura 27, se puede apreciar que el umbral ha bajado considerablemente en relación con el caso de 10 Gbps puesto que la potencia de ruido de un amplificador ($p_{ASE} = f \cdot h \cdot \gamma \cdot (g - 1) \cdot b_0$) está directamente relacionada con el ancho de banda del canal que aumenta al aumentar la velocidad de transmisión, es decir, la potencia de ruido introducida por los amplificadores es mayor y la OSNR disminuye.

Los umbrales¹ considerados para los formatos de modulación DQPSK y DPSK son 12.5dB y 12.75dB respectivamente. Aunque no sea una gran diferencia en el valor del umbral, el uso de DQPSK puede suponer un 20% más de caminos factibles para el caso del algoritmo ILP.

¹ Los valores de los umbrales utilizados son los obtenidos en Telefónica I+D mediante la herramienta de simulación VPI, pero no es objeto de estudio en este proyecto.

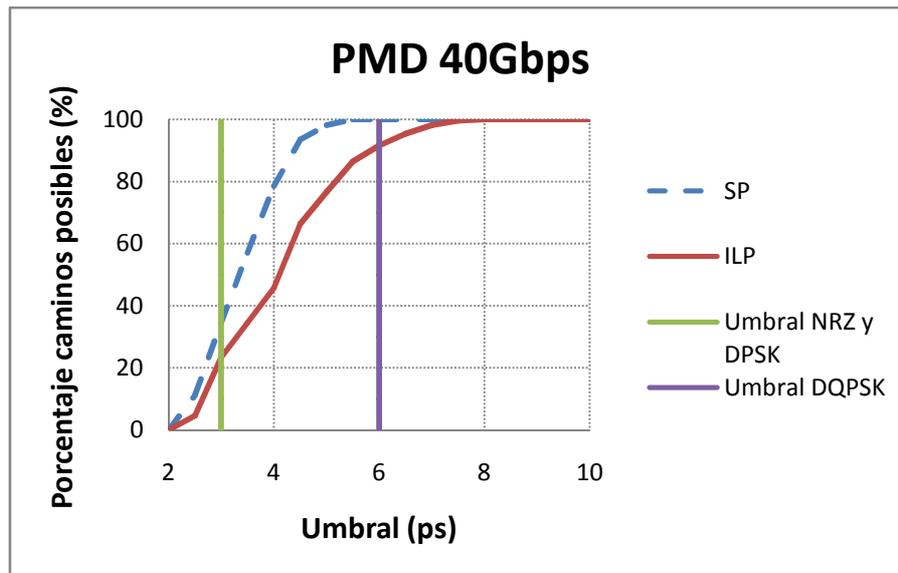


Figura 29: Porcentaje de caminos posibles frente a la máxima PMD permitida para 40 Gbps.

El motivo por el que las curvas de la PMD son crecientes, al contrario que las de OSNR, es que el pulso óptico se va ensanchando con la distancia y, llegado a un cierto punto, el receptor es incapaz de detectar la señal.

Los umbrales que sugieren algunos fabricantes son de 3 ps para formatos de modulación NRZ y DPSK y 6 ps para DQPSK. De la gráfica de la Figura 29 se deduce que con DQPSK serían posibles alrededor de un 90% de los caminos para el algoritmo ILP y el 100% para el SP, y sin embargo para DPSK y NRZ tan sólo serían de 22% y 28% respectivamente.

La conclusión que se puede extraer de este apartado es la necesidad del uso de regeneradores para hacer que los caminos sean factibles. En relación al uso de regeneradores se puede apreciar una clara diferencia entre ambos algoritmos; la solución del ILP requeriría un mayor número de regeneradores puesto que los caminos son más largos al repartir la carga por toda la red, sin embargo, con el SP la malla se llenaría antes, es decir habría que aumentar el número de equipos para introducir una fibra adicional en aquellos enlaces que lleguen al máximo de su capacidad.

5.5 Algoritmo PLIA-R

El problema consiste en encontrar el conjunto óptimo de caminos que minimicen el número de circuitos en el enlace más cargado de tal forma que todos los *lightpaths* lleguen al receptor con los valores requeridos de OSNR y PMD, sabiendo que hay algunos nodos donde la señal puede regenerarse.

Como se ha explicado anteriormente en el apartado **5.3 Cálculo de OSNR y PMD de un camino** para introducir los efectos de éstos parámetros se realiza el estudio de cada parámetro por separado. Ésta es la opción que vamos a seguir a la hora de llevar

a cabo planificación del encaminamiento mediante un ILP puesto que se escribe todo el problema y se resuelve al mismo tiempo, es decir, no hay opción de ir comprobando *lightpath* a *lightpath*.

Por lo tanto, se tienen que introducir los efectos de las limitaciones físicas en forma de restricciones del problema ILP. Los dos parámetros físicos que vamos a considerar a la hora de plantear el ILP son la PMD y la OSNR, pero la PMD sólo se va a aplicar para velocidades mayores de 40Gbps puesto que para velocidades inferiores su efecto es despreciable. Para plantear las restricciones del problema ILP se siguen las mismas consideraciones que se han descrito anteriormente, es decir, para la PMD se multiplica por la raíz cuadrada de la longitud y se obtiene un valor acumulado, y para la OSNR se calcula la potencia de ruido de todos amplificadores del camino para obtener la potencia de ruido total.

Otra consideración incluida en el planteamiento del problema es que tenemos algunos nodos con funcionalidad de regeneración mediante los cuales las señales consigan llegar al receptor cumpliendo los requisitos de OSNR y PMD. Por lo tanto partimos de una situación en la que un camino puede estar formado por uno o dos tramos, si se comprueba que en cierto punto la calidad de la señal está muy degradada se pasa por uno de los tres nodos con regeneración, que es donde acaba el tramo 1, y a continuación el camino continúa hasta el nodo destino con el tramo 2.

- **ILP Con Restricciones Físicas y Regeneradores.**

Datos de entrada:

λ_{sd} , determina la demanda entre el nodo origen 's' y el nodo destino 'd'.

k, representa cada *lightpath* de una determinada demanda 'sd'.

NR, representa el conjunto de nodos con funcionalidad de regeneración.

NI_{sd} , representa el conjunto de nodos intermedios sin funcionalidad de regeneración para una determinada demanda 'sd'.

b, denota la sección del camino. Es igual a 1 si estamos considerando la primera sección del camino y es igual a 2 si estamos en la segunda.

l_{ij} , es la longitud del enlace 'ij'.

P_{signal} , es el valor que representa la potencia de señal por canal después del Booster.

$P_{noise,ij}$, representa el valor de la potencia de ruido del link 'ij'.

D_{PMD} , es el valor de PMD de la fibra.

$OSNR_{threshold}$, mínimo valor de OSNR requerida en el receptor.

$PMD_{\text{threshold}}$, máximo valor de PMD permitido en el receptor.

Variables:

F_{bij}^k , variable binaria que indica que el *lightpath* 'k' del tramo 'b' se encamina por el link 'ij' (si $F_{bij}^k = 1$) o no (si $F_{bij}^k = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores '0' y '1'.

R_{ij}^k , variable binaria que indica si el *lightpath* 'k' que entra por el link 'ij' a los nodos de regeneración se regenera ($R_{ij}^k = 1$) o no ($R_{ij}^k = 0$). Se trata de una variable binaria puesto que sólo puede tomar los valores '0' y '1'.

F_{max} , número de conexiones que pasan por el enlace más cargado.

Objetivo:

Minimizar: F_{max}

Restricciones:

La restricción (5.1) indica que el número de circuitos que hay en el enlace más cargado tiene que ser mayor o igual al número de circuitos en el resto de los enlaces de la red.

$$F_{\text{max}} \geq \sum_{b=1}^k F_{bij}^k + \sum_{b=2}^k F_{bij}^k, \quad \forall ij \quad (5.1)$$

La restricción (5.2) indica que el *lightpath* tiene que salir del nodo origen en el tramo 1.

$$\sum_{ij|i=s} F_{bij}^k = 1, \quad \forall k, b = 1 \quad (5.2)$$

La restricción (5.3) indica que el *lightpath* tiene que entrar al nodo destino por el tramo 1 si no hay regeneración o por el tramo 2 si hay regeneración.

$$\sum_{b=1} F_{bij}^k + \sum_{b=2} F_{bij}^k = 1, \quad \forall k \quad (5.3)$$

La restricción (5.4) indica que si un *lightpath* entra a un nodo intermedio, entonces obligatoriamente tiene que salir.

$$\sum_{ij|i \in N_{\text{sd}}} F_{bij}^k - \sum_{ij|j \in N_{\text{sd}}} F_{bij}^k = 0, \quad \forall k, \forall b \quad (5.4)$$

La restricción (5.5) sirve para impedir que se generen bucles en el camino cuando el tramo 1 pasa por un nodo con regeneración.

$$\sum_{ij|i \in NR} F_{bij}^k \leq 1, \quad \forall k, \quad b = 1 \quad (5.5)$$

La restricción (5.6) determina que si un *lightpath* entra a un nodo de regeneración la señal se puede regenerar o no.

$$R_{bij}^k \leq F_{bij}^k, \quad \forall i, j, \quad \forall k, \quad b = 1 \quad (5.6)$$

La restricción (5.7) limita a que la regeneración sólo se produzca una sola vez. En realidad, la restricción (5.7) se deriva de las restricciones (5.5) y (5.6), por lo tanto no es imprescindible.

$$\sum_{ij|i \in NR} R_{bij}^k \leq 1, \quad \forall k \quad (5.7)$$

La restricción (5.8) indica que todos los *lightpaths* que se regeneren como mínimo tienen que salir de ese nodo de regeneración.

$$\sum_{ij|i \in NR} R_{bij}^k \leq \sum_{ij|i \in NR} F_{bij}^k, \quad \forall k, \quad b = 2 \quad (5.8)$$

La restricción (5.9) obliga a que si un *lightpath* se regenera, su tramo 2 debe de empezar exactamente en ese nodo.

$$1 - \sum_{ij|i \in NR} R_{bij}^k \geq \sum_{ij|j \in NR} F_{bij}^k, \quad \forall k, \quad b = 2 \quad (5.9)$$

La restricción (5.10) indica que si un *lightpath* entra en el tramo 1 al nodo de regeneración pero no se regenera, entonces tiene que salir; sin embargo si se regenera, no tiene que salir.

$$\sum_{ij|j \in NR} F_{bij}^k - \sum_{ij|i \in NR} F_{bij}^k = \sum_{ij|i \in NR} R_{bij}^k \quad \forall k, \quad b = 1 \quad (5.10)$$

La restricción (5.11) indica que un *lightpath* no puede regenerarse en el tramo 2.

$$\sum_{ij|i \in NR} F_{bij}^k - \sum_{ij|j \in NR} F_{bij}^k = \sum_{ij|i \in NR} R_{bij}^k \quad \forall k, \quad b = 2 \quad (5.11)$$

La restricción (5.12) obliga a que la OSNR de los tramos 1 y 2 sea mayor que el $OSNR_{threshold}$.

$$\sum_{ij}(P_{noise,ij} \cdot F_{bij}^{sd}) \leq P_{signal} - OSNR_{threshold}, \quad \forall k, \quad \forall b \quad (5.12)$$

La restricción (5.13) indica que la suma de la raíz cuadrada de las longitudes de los enlaces por los que pasa la señal multiplicadas por el coeficiente de PMD, no debe ser mayor del umbral de PMD para el tramo 1 y 2.

$$\sum_{ij}(F_{bij}^k \cdot l_{ij}) \cdot D_{PMD}^2 \leq PMD_{threshold}^2, \quad \forall k, \quad \forall b \quad (5.13)$$

6

Resultados de las planificaciones

6.1 Escenario de simulaciones

6.1.1 Malla fotónica

Para la realización de este proyecto fin de carrera se ha elegido una red de dominio público y por consiguiente la topología original que se ha escogido para llevar a cabo las simulaciones es la correspondiente a la red óptica troncal de Alemania, también conocida como DTnet, que ya figuró en estudios como por ejemplo en el del proyecto NOBEL [37].

Esta red está formada por 17 nodos situados en las principales ciudades alemanas y conectados mediante 26 enlaces bidireccionales, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 30) en la que se muestra, además, la numeración escogida para cada nodo:

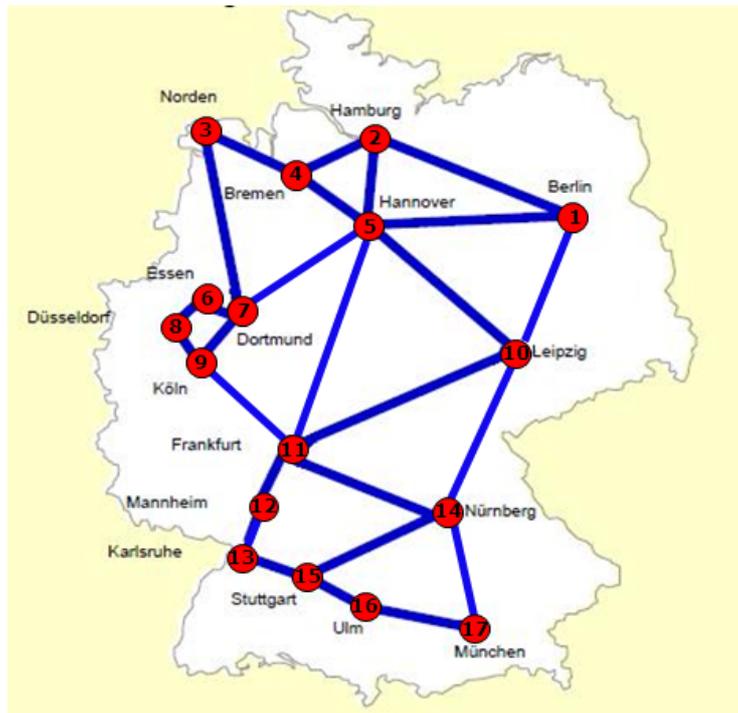


Figura 30: Topología original de la red troncal de Alemania o DTnet.

Además de la topología, otro parámetro fundamental para llevar a cabo este estudio, es la distancia de los enlaces. Para conseguir estos valores se ha medido la distancia por carretera entre las ciudades alemanas conectadas entre sí puesto que los cables de fibra óptica van paralelos a las carreteras. La Tabla 11 contiene dichos valores:

Tabla 11: Correspondencia de los enlaces y sus distancias.

Nodo origen	Nodo destino	Distancia (km)
Berlín	Hannover	286
Berlín	Hamburgo	290
Berlín	Leipzig	190
Hamburgo	Bremen	122
Hamburgo	Hannover	157
Norden	Bremen	161
Norden	Dortmund	313
Bremen	Hannover	120
Hannover	Dortmund	213
Hannover	Frankfurt	352
Hannover	Leipzig	264
Essen	Dortmund	38
Essen	Düsseldorf	35
Dortmund	Colonia	100
Düsseldorf	Colonia	40
Colonia	Frankfurt	195
Leipzig	Frankfurt	393
Leipzig	Numberg	285
Frankfurt	Numberg	230
Frankfurt	Mannheim	80
Mannheim	Karlsruhe	66
Karlsruhe	Stuttgart	80
Numberg	Stuttgart	235
Numberg	München	170
Stuttgart	Ulm	93
Ulm	München	150

Para la obtención de caminos de trabajo, el estudio de las restricciones físicas sobre la transmisión de las señales y la obtención de los caminos de supervivencia mediante protección y restauración de fallos simples, se utilizará exactamente esta topología, sin embargo para el cálculo de los caminos de supervivencia ante fallos dobles es requisito imprescindible que cada nodo esté conectado al menos mediante tres enlaces bidireccionales con otros nodos de la red, porque en caso contrario, el nodo se quedará aislado y será imposible establecer un camino de protección que lo incluya. Conviene aclarar que se ha supuesto que cada uno de los enlaces que une cada par de nodos discurre por caminos físicos disjuntos con el fin de evitar que un mismo acontecimiento afecte a más de un enlace; ejemplo: excavadora que rompe una zanja y los cables incluidos en ella.

De esta forma, como en la DTnet existen siete nodos (Norden, Essen, Düsseldorf, Mannheim, Karlsruhe, Ulm y München) conectados con sólo dos enlaces, para el caso de la restauración por fallo doble se propone el siguiente esquema (Figura 31) que consiste de la topología original a la que se le han añadido enlaces para que esos nodos no queden aislados ante un fallo doble.

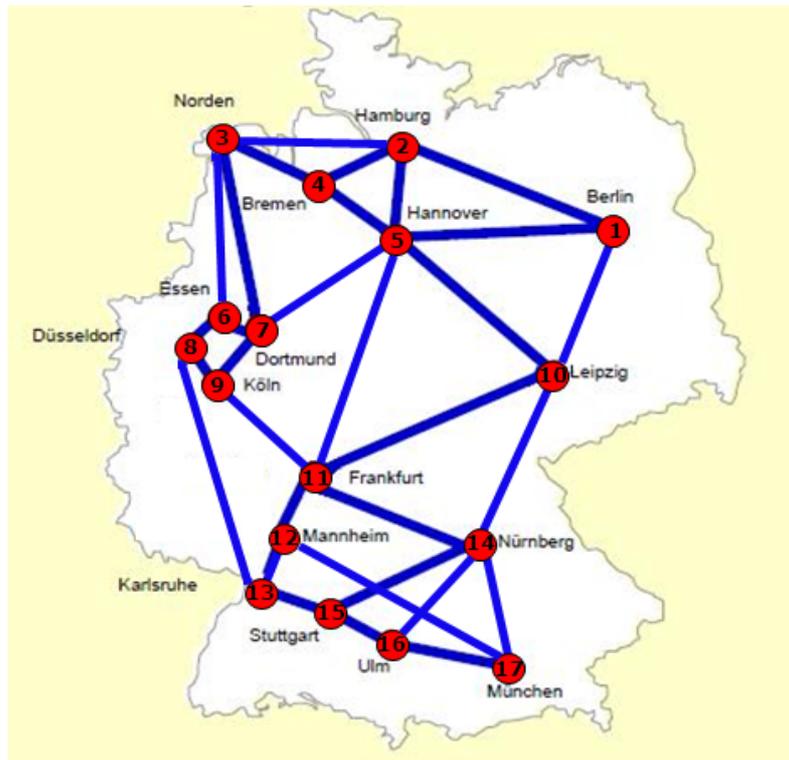


Figura 31: Topología modificada para proporcionar protección.

Como se puede apreciar se han añadido enlaces entre Norden-Hamburgo, Norden-Essen, Düsseldorf-Karlsruhe, Mannheim-München y Nürnberg-Ulm de tal forma que si hubiera un fallo doble y se cayeran dos enlaces, ningún nodo quedaría aislado. Es importante mencionar que podría haber sido cualquier otra combinación de enlaces que suponga un mínimo grado de 3 en todos los nodos.

6.1.2 Demanda de tráfico

Basándonos en algunos datos de población de las ciudades alemanas y sabiendo que con la generalización de la banda ancha en el mercado residencial la mayor parte del tráfico IP, y por lo tanto del tráfico total, procede de los usuarios particulares como se ha visto en el Capítulo 1 según los informes de Cisco, se propone la siguiente matriz de demanda de tráfico para llevar a cabo las simulaciones, donde, en principio, cada circuito indica una conexión de 10Gbps (también se considerarán circuitos de 40Gbps para el estudio de las restricciones físicas):

Tabla 12: Demanda de conexiones.

Origen	Destino	Nº Circuitos
Berlín	Düsseldorf	4
Berlín	Frankfurt	7
Berlín	Stuttgart	5
Hamburgo	Hannover	6
Hamburgo	Leipzig	7
Bemen	Leipzig	4
Hannover	Stuttgart	5
Essen	Leipzig	4
Essen	Frankfurt	4
Dortmund	Leipzig	5
Dortmund	Frankfurt	5
Düsseldorf	Frankfurt	6
Colonia	Stuttgart	4
Leipzig	Stuttgart	7
Frankfurt	Hamburgo	6
Frankfurt	Hannover	7
Frankfurt	Colonia	6
Frankfurt	Stuttgart	7
Numberg	Berlín	1
München	Hamburgo	2

6.2 Algoritmos implementados

Esta sección tiene como objetivo hacer un resumen de los algoritmos que se han propuesto a lo largo del proyecto y de los que se van a mostrar los resultados en próximos apartados:

En primer lugar, para la obtención de los caminos de trabajo, se ha utilizado el ILP descrito en el capítulo **3.3 Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica** y se han comparado sus resultados con los del camino más corto.

A continuación abordamos el tema de la supervivencia en la red y como recordamos, tenemos dos técnicas: protección y restauración. En cuanto a la protección, en la sección **4.2.1 Método del Camino Disjunto** se presentó un algoritmo ILP para la planificación de los caminos de supervivencia dados unos caminos de trabajo conocidos. Los resultados que se van a presentar en este capítulo parten de los caminos de trabajo calculados mediante el SP y se obtienen los caminos de supervivencia por el SP y el ILP de camino disjunto. Además, se hace uso del ILP de optimización conjunta de los caminos de trabajo y de supervivencia que se presentó en **4.2.2 Método de Optimización Conjunta**. Por otro lado, para la restauración, en la que también se parte de los caminos de trabajo calculados mediante el SP, se comparan los caminos de restauración obtenidos mediante el SP y los ILPs definidos en **4.3 Algoritmos de planificación para supervivencia de red mediante el esquema de restauración** tanto para fallo simple como para fallo doble.

Por último, se presentarán los resultados del algoritmo que tiene en cuenta las restricciones físicas **5.5 Algoritmo PLIA-R**, siendo los circuitos de 10Gbps, para el que sólo se considera el efecto de la OSNR, y de 40Gbps, para los que además se considera el efecto de la PMD, y se compara con el ILP de **3.3 Ejemplo de ILP para el encaminamiento en malla fotónica**.

6.3 Representación de las soluciones

Tal y como se comentó en capítulos anteriores, el escenario de red, la definición del problema ILP y el posterior análisis de las soluciones proporcionadas por el CPLEX se han llevado a cabo mediante el programa Matlab. Para la representación gráfica de las soluciones se ha elegido la aplicación “Php Weathermap 0.96” que tras adaptarse convenientemente, permite mostrar la ocupación de cada enlace de acuerdo con el número de caminos que lo atraviesan mediante una escala de colores. Además se ha procedido a comparar los resultados obtenidos de las simulaciones de los algoritmos ILP explicados anteriormente con los resultados del algoritmo del camino más corto (SP).

Hay que mencionar que en los mapas obtenidos por “Php Weathermap 0.96” las distancias entre los nodos de la red no están a escala y se han adaptado para una mejor visualización. Aparte de la escala de colores en los enlaces también aparecen dos recuadros indicando el número exacto de caminos que pasan por dicho enlace, uno en cada dirección y puesto que algunos enlaces eran demasiado cortos, esta información no se apreciaba adecuadamente.

Además de estos mapas, se presentan histogramas obtenidos en Matlab para poder observar con mayor claridad las diferencias entre los distintos algoritmos. En concreto, se ha obtenido el histograma de la distribución de distancias por camino de trabajo, número de saltos por camino (siendo el número de saltos de un camino, el número de nodos por los que está formada la ruta menos uno) y ocupación por enlace.

6.4 Obtención de los caminos de trabajo

El problema consiste en calcular el conjunto de caminos de trabajo para cada demanda entre dos nodos. Las siguientes figuras muestran la ocupación de la planificación de la red para el algoritmo descrito en el Capítulo 3. Y como comparación mostramos también el resultado de los caminos calculados mediante el algoritmo del camino más corto. Hay que mencionar que el algoritmo más corto puede dar distintas soluciones dependiendo de la unidad de medida considerada, en este caso tomaremos que el parámetro de coste es la distancia de los caminos.

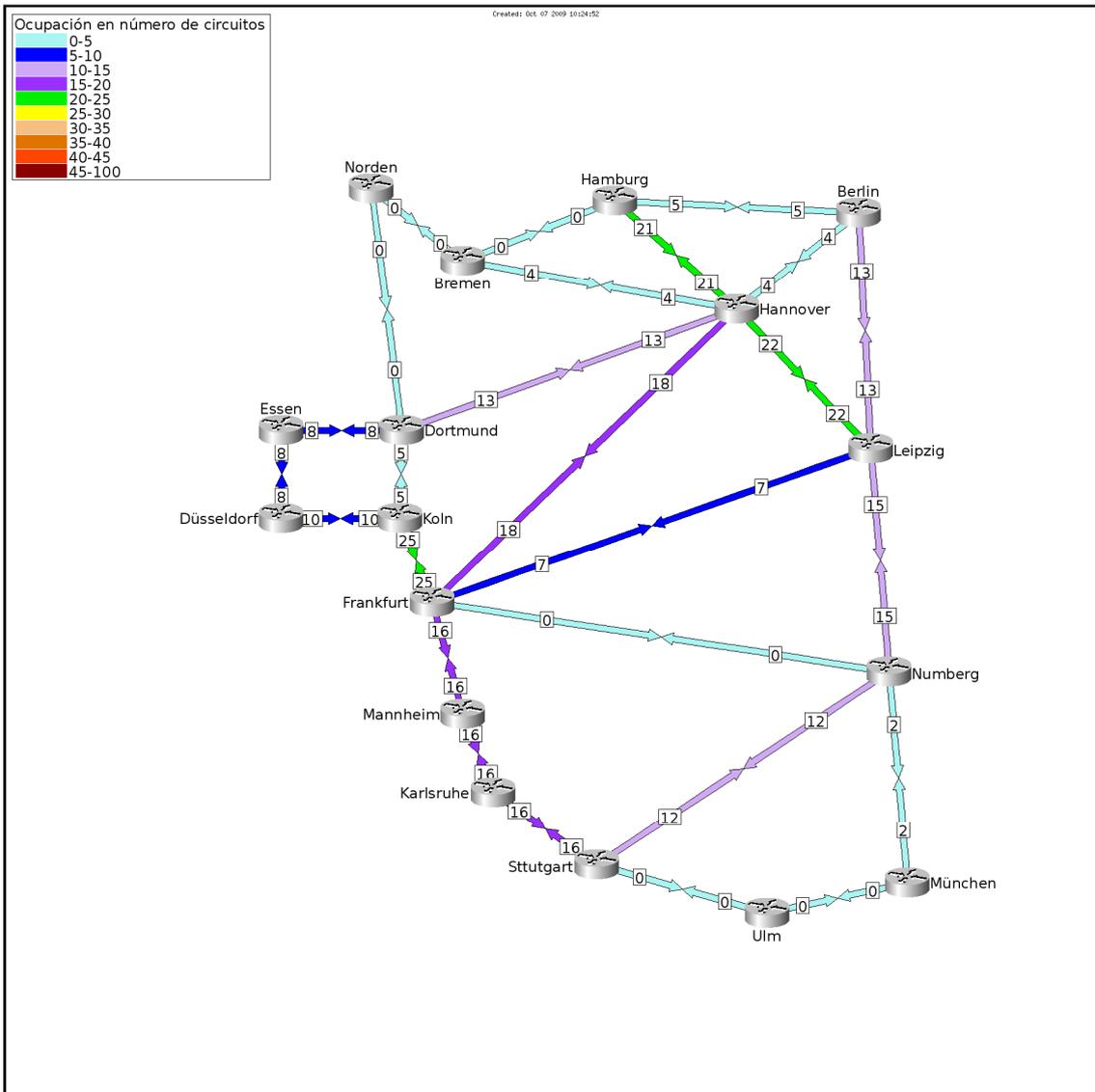


Figura 32: Estado de la red tras una planificación mediante el algoritmo del camino más corto.

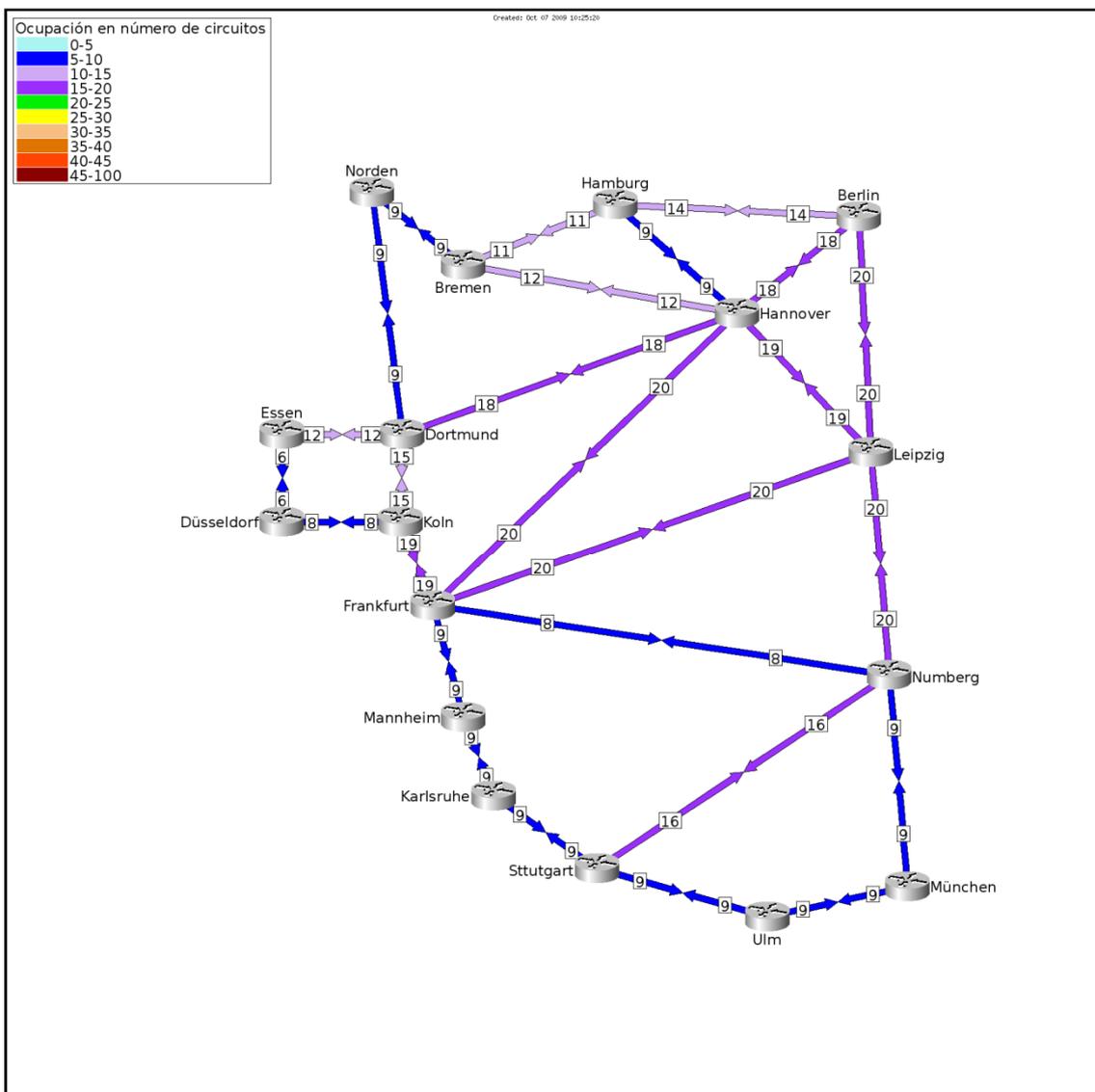


Figura 33: Estado de la red tras una planificación mediante el ILP individual.

Podemos comprobar claramente cómo el algoritmo del camino más corto tiende a cargar en mayor proporción algunos enlaces (color verde en la Figura 32) dejando muchos otros vacíos (color azul claro en la Figura 32), mientras que el ILP reparte la carga por todos los enlaces de la red (todos los enlaces son azul oscuro y morado en la Figura 33).

Para una mejor evaluación de los resultados de los algoritmos presentamos los siguientes datos: los histogramas de la ocupación por enlace, de las distancias de los caminos y del número de saltos, además de una tabla comparativa con las medias, los valores máximos y la desviación estándar.

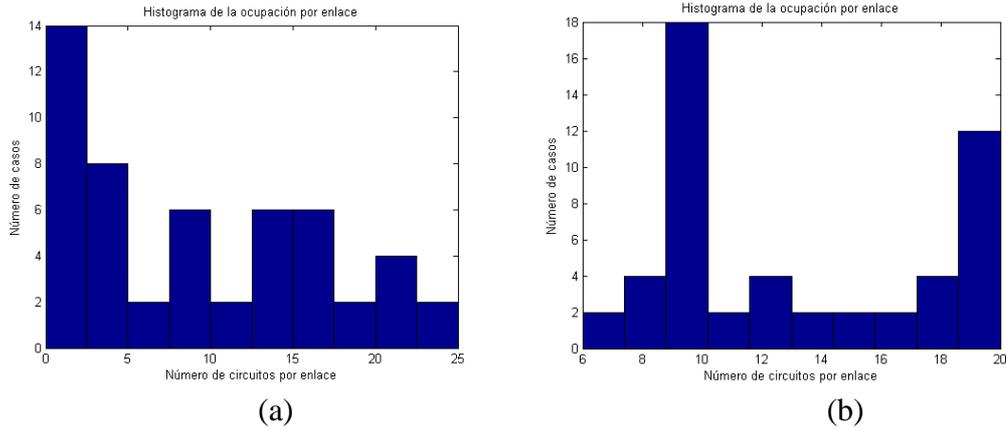


Figura 34: Histogramas de la ocupación por enlace para a) SP y b) ILP.

Tabla 13: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.

Ocupación (num. circuitos)	SP	ILP
Max	25	20
Media	9,2308	12,9615
Desv. est.	7,6610	4,7731

En función de la ocupación de los enlaces de la red se puede observar claramente que el enlace más cargado tras la planificación mediante el ILP cuenta con 20 circuitos mientras que el número de circuitos en el enlace más cargado con el SP es de 25. Sin embargo la ocupación media del ILP es mayor. Esto es debido a que el SP deja muchos enlaces casi sin carga y mientras que otros tienen mucha ocupación, en cambio la ocupación del ILP está repartida por todos los enlaces.

No obstante, es interesante mencionar que en el trabajo llevado a cabo en Telefónica I+D se ha realizado la comparación de ambos algoritmos utilizando la red de España (topología que no es posible publicar por motivos de confidencialidad), y en ella las mejoras del ILP con respecto al SP son más acusadas. Esto nos indica que los algoritmos de optimización lineal son muy dependientes de la topología y la demanda consideradas. Las mejoras obtenidas en ese caso alcanzaban el 10%.

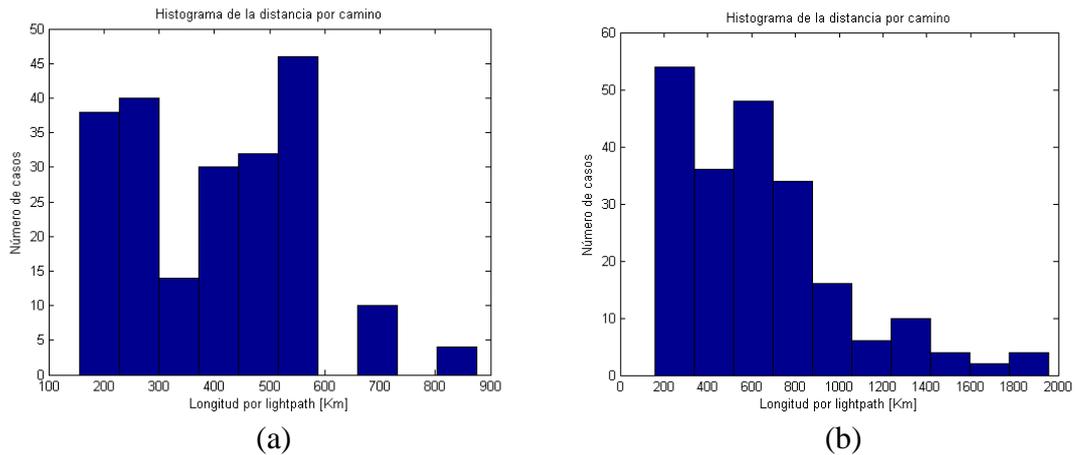


Figura 35: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) SP y b) ILP.

Tabla 14: Comparativa de la distancia en km por camino de trabajo para los distintos algoritmos.

Distancia (km)	SP	ILP
Max	876	1955
Media	410,4206	639,8224
Desv. est.	164,4573	380,4349

El algoritmo más corto es el que da lugar a rutas de menor distancia (876 km como puede verse en la Tabla 14) puesto que ese es su objetivo, por haber definido la distancia como el coste o medida de referencia de dicho algoritmo. Como era de esperar, el ILP tiene caminos de mayores distancias en media debido a que reparte la carga por todos los enlaces de la red y por lo tanto las distancias son mayores.

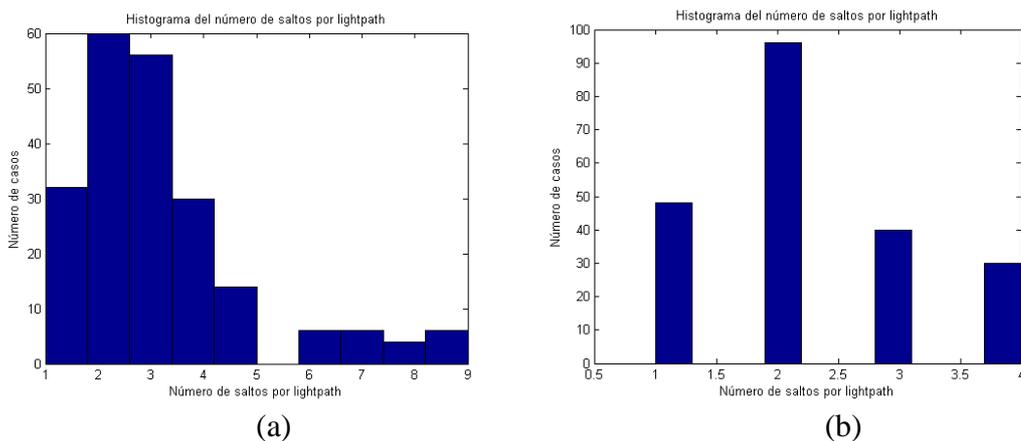


Figura 36: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) ILP y b) SP.

Tabla 15: Comparativa del número de saltos por camino de trabajo para los distintos algoritmos.

Número de saltos	SP	ILP
Max	4	9
Media	2,2430	3,1495
Desv. est.	0,9577	1,8579

De nuevo con el número de saltos por camino se vuelve a comprobar cómo el SP presenta caminos más cortos que como máximo tienen 4 saltos, mientras que el ILP da lugar a caminos con mayor número de saltos (de máximo 9) por ser de mayor distancia al repartir la carga por toda la red.

6.5 Obtención de caminos considerando protección

En esta sección presentamos los resultados obtenidos de los algoritmos de cálculo de camino de supervivencia ante casos de fallo de la red que, como se detalló en el Capítulo 4, se han clasificado en “protección 1+1” y “restauración”, y como se indicó en **6.2 Algoritmos implementados** se han seguido las siguientes tres técnicas:

- SP + SP: primero se calculan los caminos de trabajo mediante un SP por distancias y a continuación se calculan las rutas de protección también mediante el SP por distancias.
- SP + ILP: primero se calculan los caminos de trabajo mediante un SP por distancias y a continuación se calculan las rutas de protección mediante el ILP por el método del camino disjunto.
- ILP conjunto: optimizando conjuntamente los caminos de trabajo y los de protección.

Por otro lado, para la restauración de caminos tanto por fallo simple como por fallo doble, se van a ver los resultados obtenidos mediante:

- SP + SP: los caminos de trabajo se calculan mediante el SP por distancias al igual que los caminos de restauración.
- SP + ILP: los caminos de trabajo se calculan mediante el SP por distancias mientras que los caminos de restauración se optimizan mediante un ILP.

6.5.1 Esquema de protección 1+1

○ SP + ILP

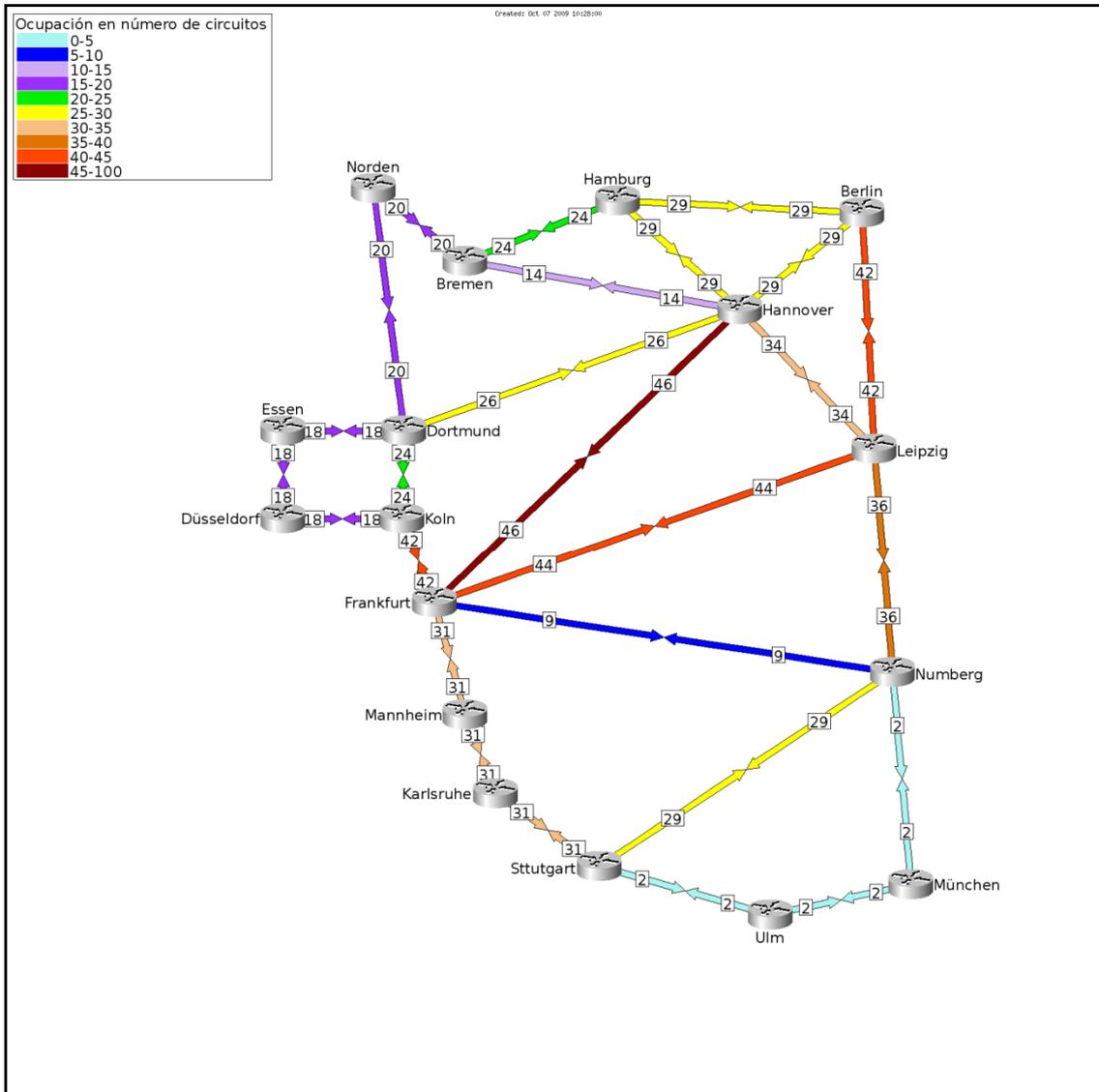


Figura 38: Estado de la red tras una planificación de los caminos de trabajo mediante el SP y los de protección mediante un ILP.

○ **ILP conjunto**

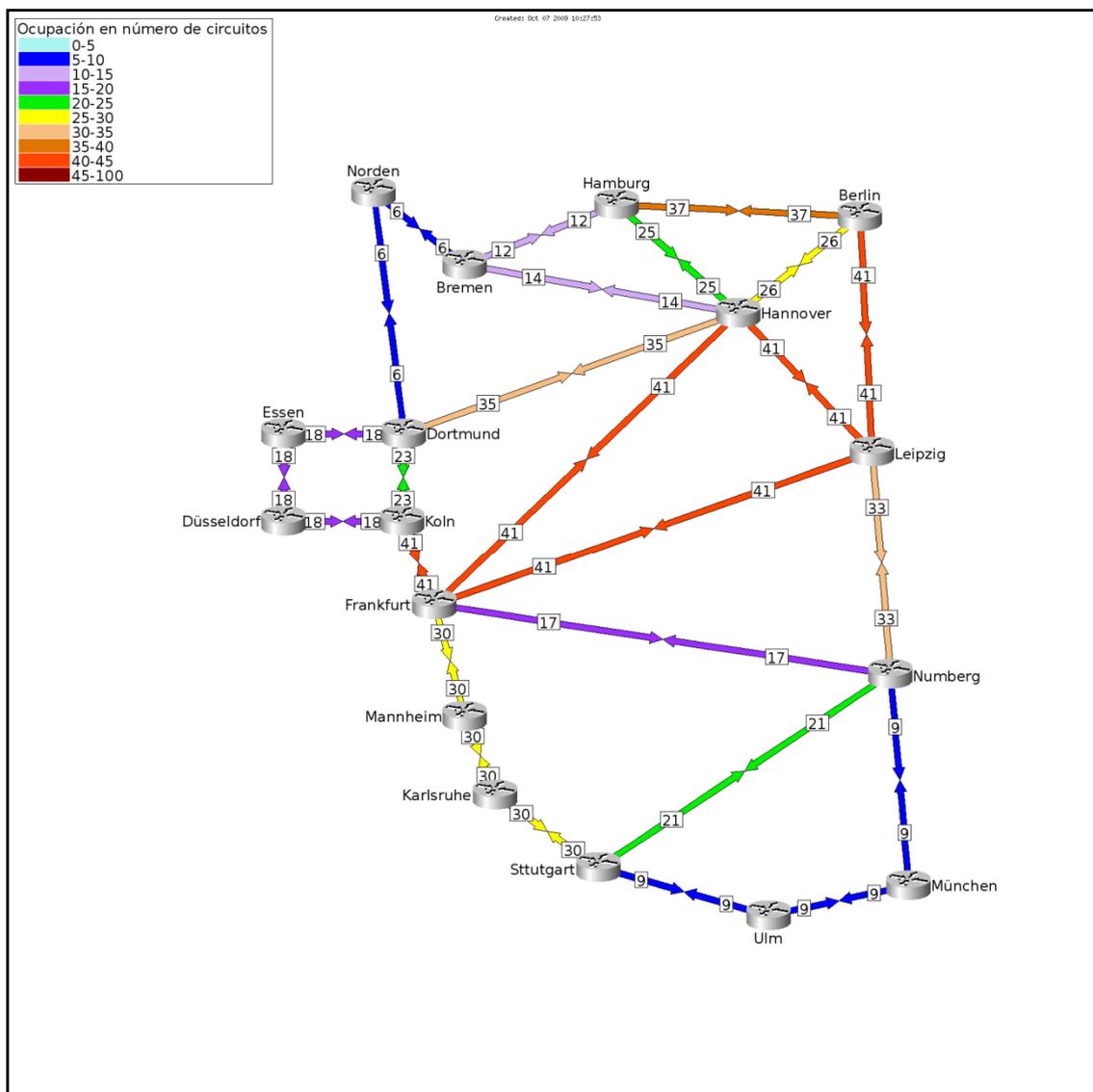


Figura 39: Estado de la red tras una planificación de los caminos de trabajo y de protección mediante el ILP conjunto.

La situación de la red comparada con el caso sin protección (Figura 33) es bien distinta ya que el número de caminos a obtener es el doble en este caso. Aparte de ello se puede comprobar cómo la distribución de la carga en el caso del SP-SP (Figura 37) es muy desigual: los enlaces Hannover-Frankfurt y Köln-Frankfurt tienen un color marrón que es el más alto de la escala, mientras que los enlaces de Norden, de Ulm y München están prácticamente vacíos. Por otro lado, en el caso del SP-ILP se comprueba como los enlaces más cargados del SP-SP ahora lo están menos y su carga se ha distribuido por otros enlaces, sin embargo la zona de Norden, Ulm y München sigue estando vacía. Para acabar con ese problema, el ILP conjunto encamina los circuitos por todos los enlaces de la red y así conseguir una mejor distribución (Figura 39).

De la misma forma que en el apartado anterior procedemos a evaluar los histogramas y los valores máximos, medios y desviaciones para cada algoritmo.

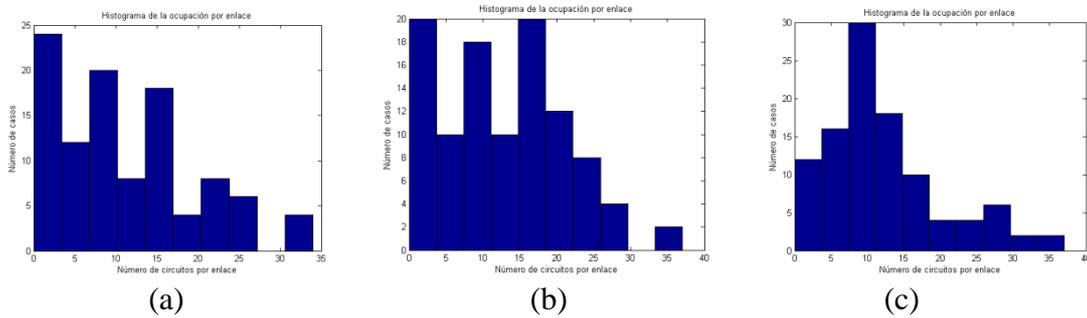


Figura 40: Histogramas de la ocupación por enlace para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.

Tabla 16: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.

Ocupación (num. circuitos)	SP + SP	SP +ILP	ILP conjunto
Max	52	46	41
Media	22,1923	25,0000	24,2692
Desv est	14,2582	12,3954	11,9822

En función de la ocupación de los enlaces de la red se puede observar claramente que ésta es menor en el caso del ILP conjunto puesto que al repartir la carga por todos los enlaces, éstos estarán menos cargados que si utilizamos el camino más corto sin importar la ocupación. Indudablemente, estos valores son mayores que los del caso sin protección ya que hay el doble de circuitos, pero se pueden extraer las mismas conclusiones. Como explicábamos, el que presenta peores prestaciones en cuanto a la ocupación de los enlaces es el SP-SP y en una posición intermedia se encuentra el SP-ILP puesto que los caminos de trabajo están obtenidos mediante el SP que no tiene como objetivo el minimizar el enlace más cargado.

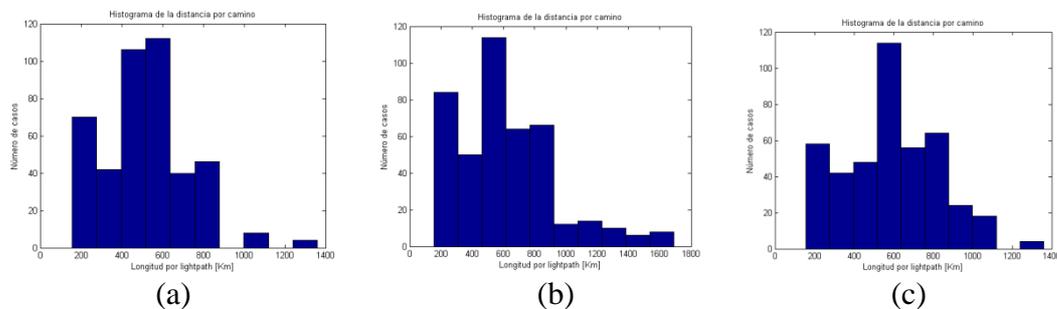


Figura 41: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.

Tabla 17: Comparativa de la distancia en km por camino para los distintos algoritmos.

Distancia (km)	SP + SP	SP + ILP	ILP conjunto
Max	1360	1691	1360
Media	527,2570	611,7943	587,7056
Desv est	219,1212	317,0323	245,1877

Exactamente igual que en el caso sin protección, aquí también se ve cómo el SP-ILP ha lugar a caminos de mayores distancias debido a que reparte la carga por todos los enlaces de la red y por lo tanto son más largos. Sin embargo, se ha dado la coincidencia de que el camino más largo del SP-SP es igual que el camino más largo que el ILP conjunto. Esto puede haber ocurrido porque al buscar los caminos de supervivencia mediante el SP, a éstos no se les permite utilizar los mismos enlaces por los que ha pasado el camino de trabajo correspondiente y por consiguiente, no son tan directos del nodo origen al nodo destino.

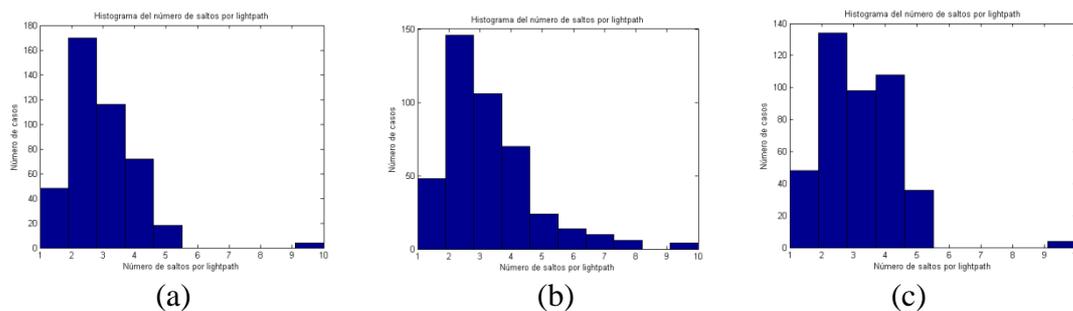


Figura 42: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) SP + SP, b) SP + ILP y c) ILP conjunto.

Tabla 18: Comparativa del número de saltos por camino para los distintos algoritmos.

Número de saltos	SP + SP	SP - ILP	ILP conjunto
Max	10	10	10
Media	2,6962	3,0373	2,9485
Desv est	1,2456	1,6306	1,3453

El hecho de que el máximo número de saltos sea igual para los tres casos hace indicar que el ILP conjunto ha conseguido una solución parecida a la del SP-SP pero consiguiendo una mejor optimización de la carga. No obstante, el número de saltos por camino no es el parámetro más determinante para concluir que un algoritmo tiene mejores prestaciones que otro.

6.5.2 Esquema de restauración

Dado que resultaría muy complejo presentar un mapa del estado de la red para cada caso de fallo, puesto que para fallo simple serían 52 mapas (ya que hay 52 enlaces) y para fallo doble serían 62x62 mapas (62 enlaces en la topología en la que todos los nodos tienen al menos 3 enlaces), se ha optado por mostrar los resultados de las restauraciones en forma de gráficos de Excel en donde se puede observar el número de circuitos en el enlace más cargado.

En concreto, los valores mostrados en las siguientes figuras corresponden con el peor de todos los casos de fallo, es decir, para cada caso de fallo se ha ido comprobando el número de circuitos en el enlace más cargado, resultando así 52 valores para fallo simple y 3844 valores (62x62) para fallo doble; una vez terminadas todas las iteraciones de los dos algoritmos, nos quedamos con el máximo de ese conjunto de valores.

- **Fallo Simple.**

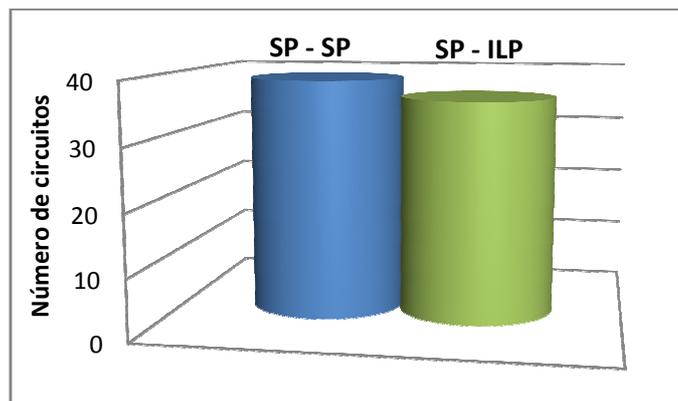


Figura 43: Comparación de los diferentes algoritmos para la restauración de fallo simple en términos del número de circuitos del enlace más cargado.

○ **Fallo Doble.**

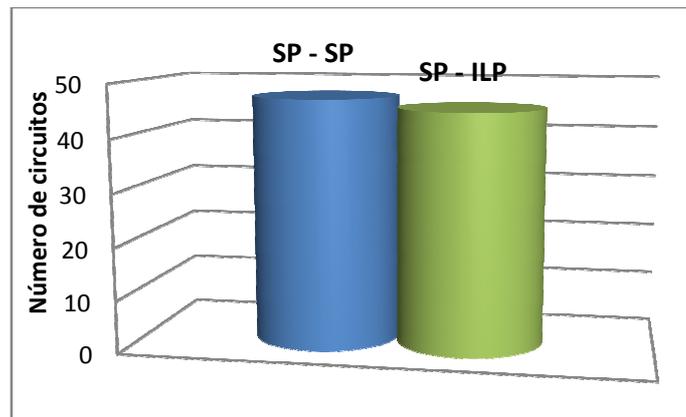


Figura 44: Comparación de los diferentes algoritmos para la restauración de fallo doble en términos del número de circuitos en el enlace más cargado.

Como se puede observar en la figura anterior, mediante el SP-ILP, es decir, el que obtiene los caminos de supervivencia para la restauración en caso de fallo simple en la red mediante un ILP dados unos caminos de trabajo calculados por el SP, tiene mejores prestaciones que si los caminos de supervivencia se obtienen mediante un SP. Esto es debido a que como ya hemos visto en varias ocasiones, el algoritmo del camino más corto no se preocupa por la ocupación de los enlaces y cargar mucho unos mientras que deja otros prácticamente vacíos. Esta situación se da tanto para fallo simple (Figura 43) como para fallo doble (Figura 44). En ambos casos la diferencia entre las dos técnicas es más o menos similar.

6.6 Obtención de caminos considerando limitaciones físicas

El problema consiste en encontrar el conjunto óptimo de caminos que minimicen el número de circuitos en el enlace más cargado de tal forma que todos los *lightpaths* lleguen al receptor con los valores requeridos de OSNR y PMD, sabiendo que hay algunos nodos donde la señal puede regenerarse. Específicamente, los nodos que se han escogido para tener funcionalidad de regeneración son: Hannover (5), Leipzig (10) y Frankfurt (11).

Para un escenario de 10 Gbps, sin tener en cuenta la protección y con un umbral de 18.75 dB, las siguientes figuras muestran una comparativa entre los tres algoritmos: el del camino más corto y el ILP que no tienen en cuenta las limitaciones físicas ni los regeneradores y el ILP que tiene en cuenta las limitaciones físicas y los tres regeneradores.

En concreto, en la Figura 45 se presentan los valores del número de circuitos en el enlace más cargado y en la Figura 46 el número de regeneraciones que necesitarían los caminos si se utilizan los algoritmos que no los tienen en cuenta (SP e ILP sin

regeneradores) frente al número de regeneraciones que se llevan a cabo en el algoritmo que sí los tiene en cuenta (ILP con regeneradores).

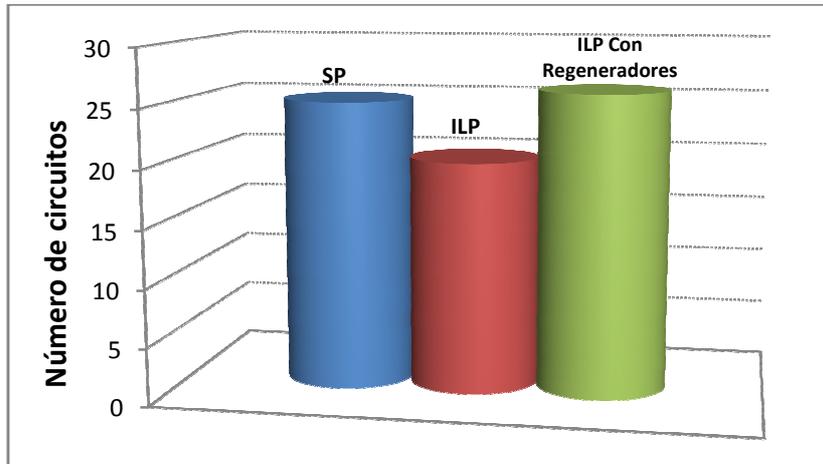


Figura 45: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de circuitos en el enlace más cargado para un escenario de 10 Gbps y sin protección.

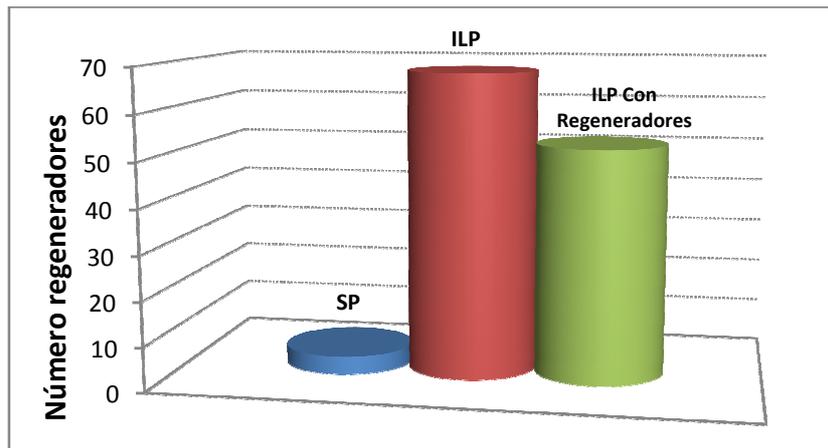


Figura 46: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de regeneradores necesarios para un escenario de 10 Gbps y sin protección.

De la misma forma, para un escenario de 40 Gbps, sin tener en cuenta la protección y con un umbral de 12.5 dB las siguientes figuras muestran el número de circuitos en el enlace más cargado y el número de regeneraciones para los tres algoritmos:

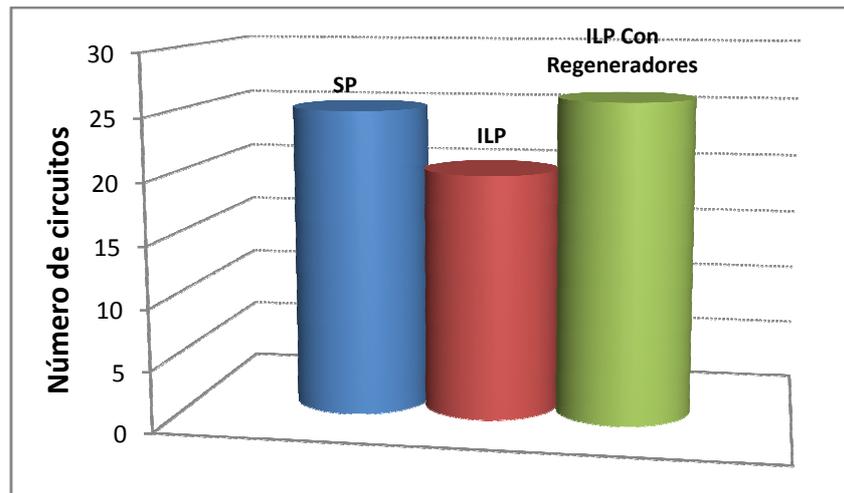


Figura 47: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de circuitos en el enlace más cargado para un escenario de 40 Gbps y sin protección.

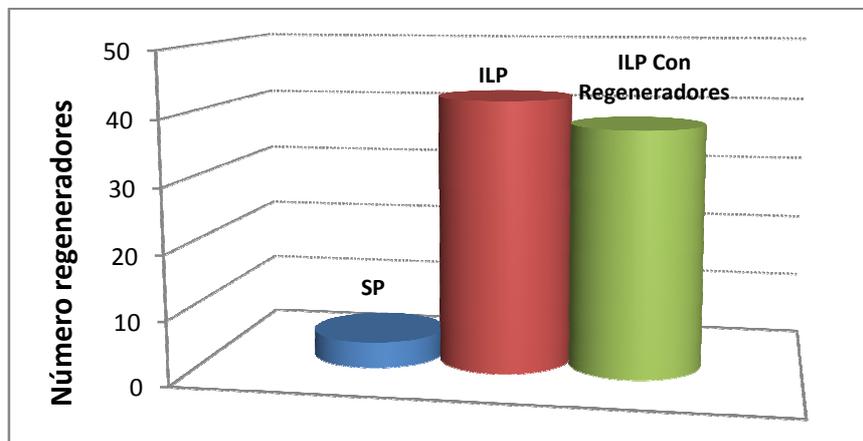


Figura 48: Comparación de los distintos algoritmos en términos del número de regeneradores necesarios para un escenario de 40 Gbps y sin protección.

Como se puede comprobar, para ambos escenarios el algoritmo propuesto que tiene en cuenta las limitaciones físicas incrementa el número de circuitos en el enlace más cargado por el hecho de que directamente intenta buscar posibles combinaciones para que las rutas cumplan los umbrales. Por otro lado, para aquellas demandas para las que el algoritmo no encuentra un camino posible con esas condiciones, se hace que pasen obligatoriamente por los nodos con regeneración, pero el número de regeneraciones es menor que si se permite a los caminos sean tan largos para repartir la carga por la red.

Los mapas resultantes del algoritmo con regeneradores se muestran a continuación y habría que compararlos con los mapas del apartado **6.4 Obtención de los caminos de trabajo**.

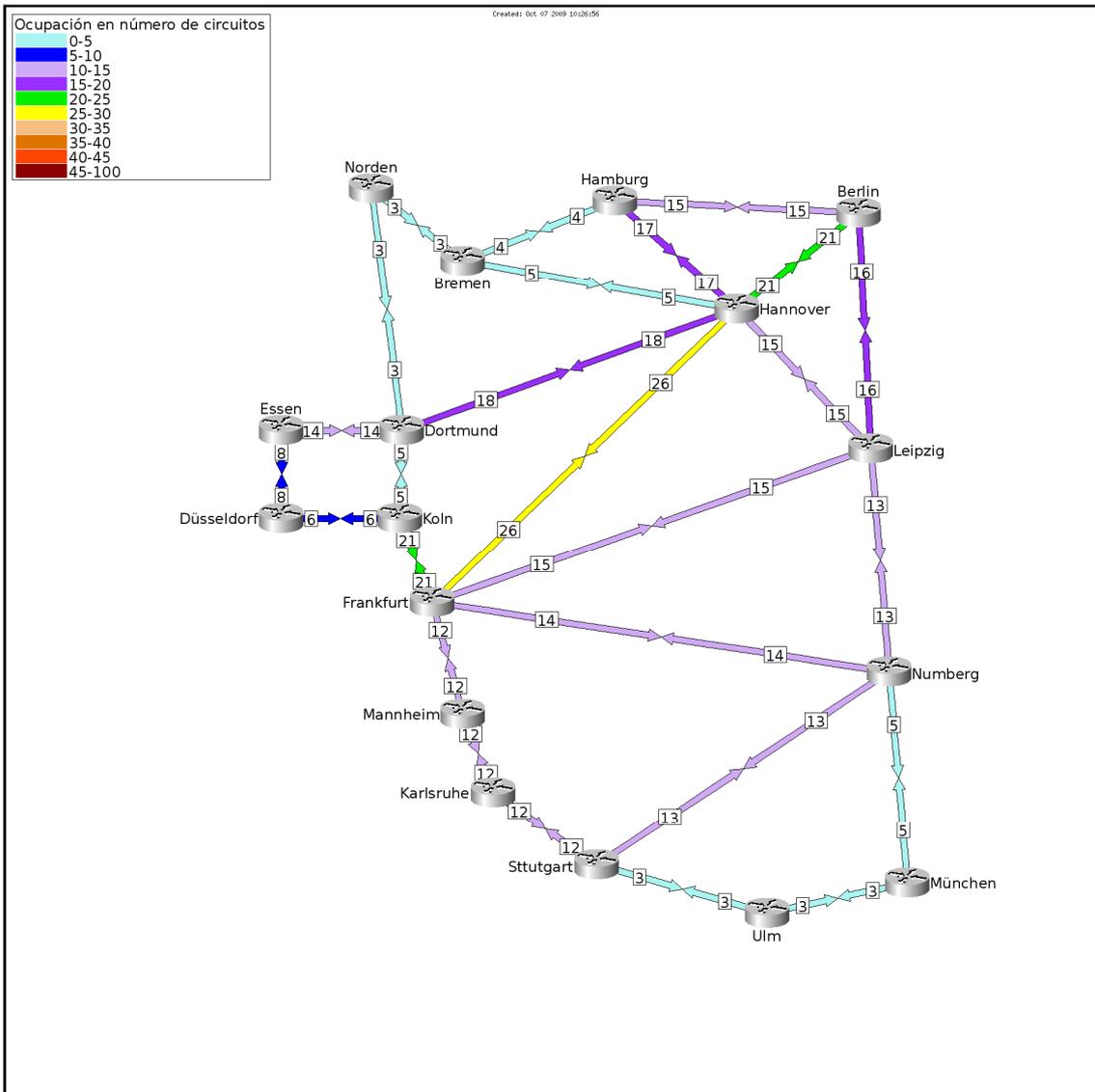


Figura 49: Estado de la red tras una planificación mediante ILP teniendo en cuenta las restricciones físicas y nodos de regeneración en Hannover, Leipzig y Frankfurt para un escenario de 10 Gbps.

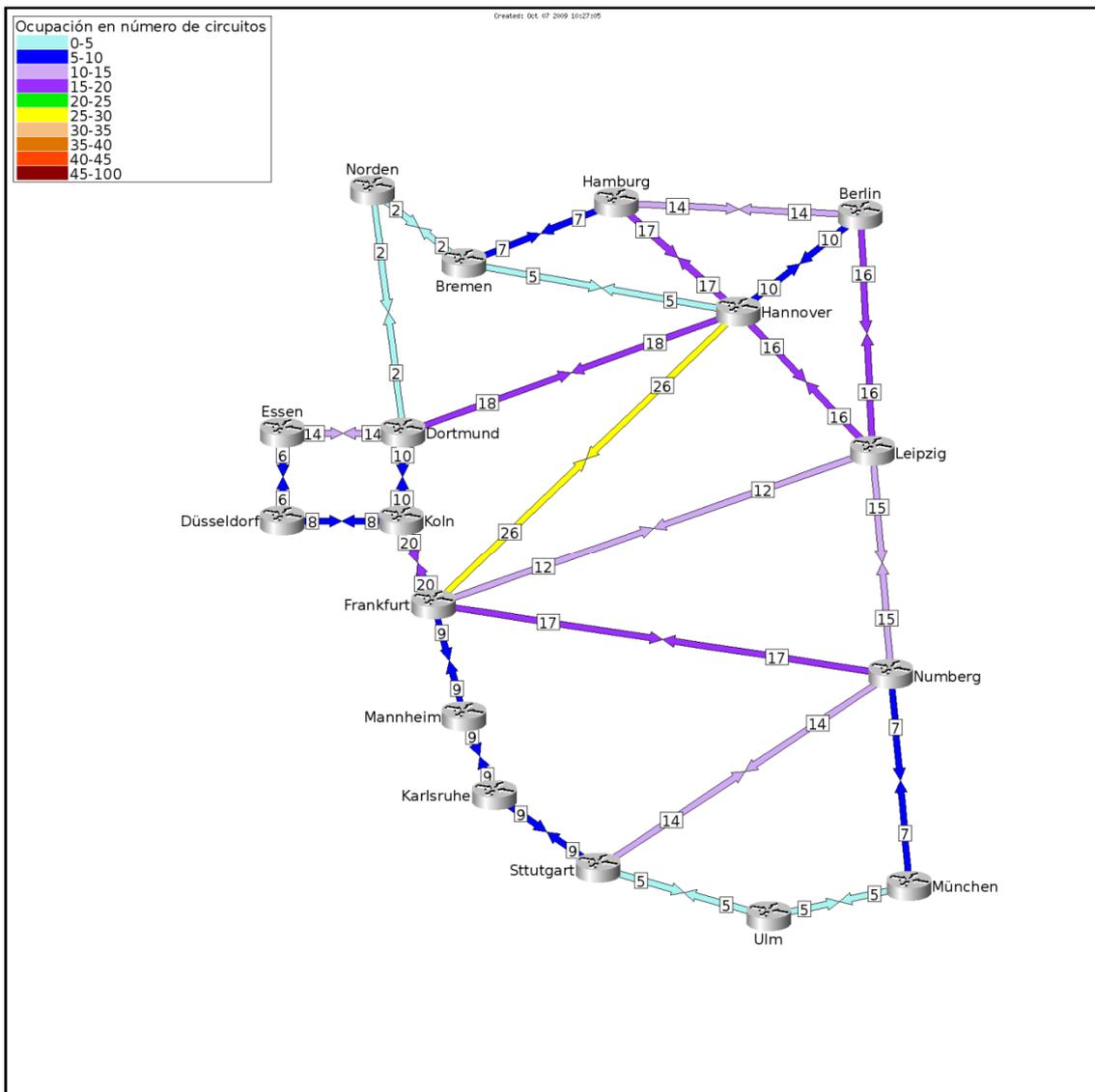


Figura 50: Estado de la red tras una planificación mediante ILP teniendo en cuenta las restricciones físicas y nodos de regeneración en Hannover, Leipzig y Frankfurt para un escenario de 40 Gbps.

La situación comparada con aquella obtenida mediante la planificación de los caminos de trabajo a través del ILP que no tenía en cuenta las restricciones físicas (**6.4 Obtención de los caminos de trabajo** en Figura 33) es bien distinta. En esta ocasión los ILPs que tienen en cuenta las restricciones logran un menor reparto de los circuitos por todos los enlaces de la red como se puede observar en la Figura 49 y la Figura 50, en las que aparecen muchos de los enlaces en color azul claro indicando poca carga, mientras que aparecen otros en color verde y amarillo referidos a una carga mayor, de forma diferente a lo que ocurría en la Figura 33 donde sólo aparecían colores en tonos azules y morados.

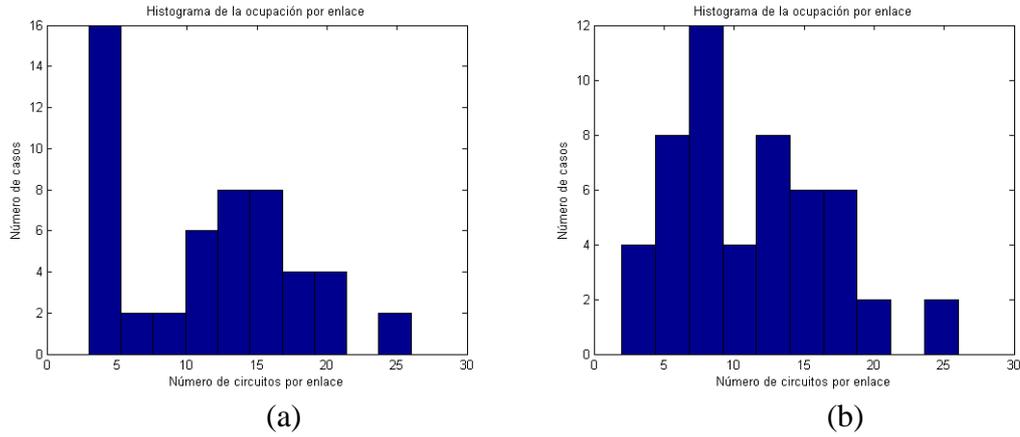


Figura 51: Histogramas de la ocupación por enlace para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.

Tabla 19: Comparativa de la ocupación por enlace para los distintos algoritmos.

Ocupación (num. circuitos)	ILP	ILP Reg 10Gbps	ILP Reg 40 Gbps
Max	20	26	26
Media	12,9615	11,5	11,2692
Desv est	4,7731	6,4245	5,8381

Los valores que se muestran para el ILP son los mismos del **6.4 Obtención de los caminos de trabajo** en los que no se tenía en cuenta las limitaciones físicas ni los regeneradores.

En cuanto a la ocupación de los enlaces de la red se puede observar un efecto curioso. En principio, como se explicó en los **6.4 Obtención de los caminos de trabajo** y **6.5 Obtención de caminos considerando protección**, la ocupación de los enlaces mediante un algoritmo ILP debería ser menor que para el algoritmo SP, sin embargo, para los ILP que tienen en cuenta las limitaciones físicas y los regeneradores, esto no es así puesto que, al intentar que los caminos cumplan las restricciones físicas, éstos van a tener menos enlaces posibles para poder llegar al destino con unos valores de señal aceptables y el ILP va a tener que encaminarlos de forma más directa y más parecida al resultado que da el SP, obteniendo así unos valores de ocupación mayores.

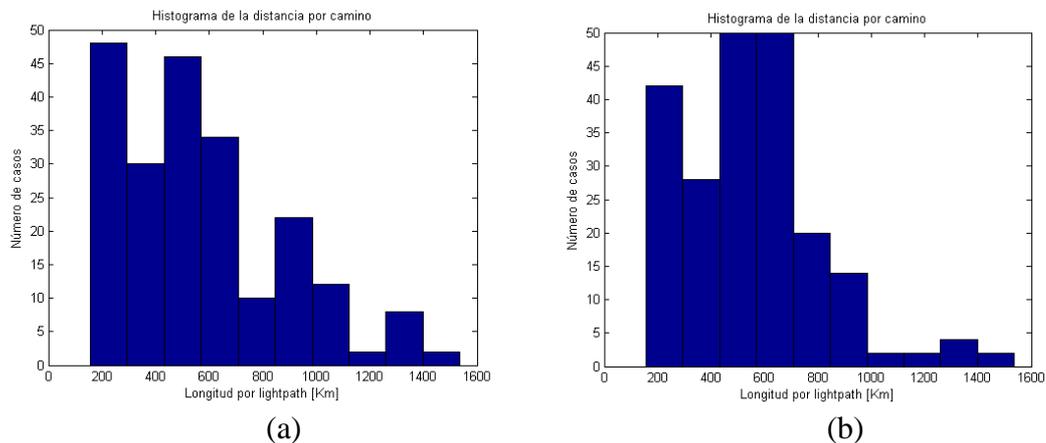


Figura 52: Histogramas de las distancias por camino de trabajo para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.

Tabla 20: Comparativa de la distancia en km por camino para los distintos algoritmos.

Distancia (km)	ILP	ILP Reg 10Gbps	ILP Reg 40 Gbps
Max	1955	1536	1536
Media	639,8224	573,2150	549,8411
Desv est	380,4349	309,9240	263,8293

Si por el contrario nos fijamos en la distancia por camino de trabajo, entre los distintos ILPs vemos que los que tienen en cuenta las limitaciones físicas y los tres regeneradores han dado lugar a una solución en la que las distancias son menores que comparadas con las del ILP básico ya que intentan escoger caminos que directamente cumplan los umbrales y esto significa que los caminos sean más cortos, pues en definitiva, como hemos visto, la OSNR y la PMD dependen del número de vanos y la distancia respectivamente.

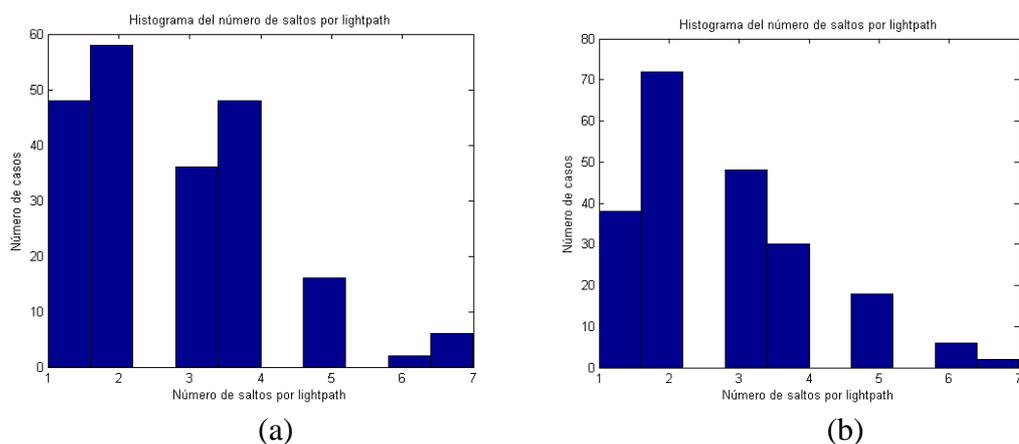


Figura 53: Histogramas del número de saltos por camino de trabajo para a) ILP con regeneración a 10Gbps y b) ILP con regeneración a 40Gbps.

Tabla 21: Comparativa del número de saltos por camino para los distintos algoritmos.

Número de saltos	ILP	ILP Reg 10Gbps	ILP Reg 40 Gbps
Max	9	7	7
Media	3,1495	2,7944	2,7383
Desv est	1,8579	1,4806	1,3658

Lo anteriormente explicado para la distancia de los caminos se puede aplicar de la misma forma al número de saltos por ruta. El ILP básico da lugar a caminos con mayor número de saltos porque a éstos no se les ha impuesto la obligación de cumplir con los umbrales requeridos en el receptor al contrario que para los que tienen en cuenta las restricciones físicas. Por ello sus caminos son más cortos y presentan menor número de saltos.

7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

En este proyecto se han mostrado varias formulaciones ILP para llevar a cabo el encaminamiento en una red óptica troncal. En concreto se han descrito los algoritmos para proporcionar supervivencia ante casos de fallo, como son la protección 1+1 y la restauración, y búsqueda de camino factible en función de los umbrales requeridos para que la señal llegue al receptor en condiciones favorables y sin errores.

Se han comparado los resultados obtenidos por los ILP con los del camino más corto y a raíz de esa comparación se puede concluir lo siguiente:

- Con un algoritmo ILP se consigue repartir la carga por todos los enlaces de la red, y con el SP se llenan antes algunos enlaces lo que significa que habría que introducir más fibras en dichos enlaces. En otras palabras, el ILP consigue alargar el tiempo de vida de la red actual.
- Sin embargo, los caminos resultantes del ILP son más largos y por lo tanto, necesitarán regeneradores para llegar al receptor con una calidad de señal. Habría que hacer un estudio para determinar qué opción requiere mayores inversiones: el despliegue de una nueva fibra frente al uso de regeneradores.
- En cualquier caso, estos algoritmos no pueden ser implementados en tiempo real puesto que necesitan conocer la demanda de tráfico a priori. Para implementar algoritmos con prestaciones similares se está estudiando la posibilidad de desplegar un PCE (*Path Computation Element*) [51] que sea capaz de conseguir la información necesaria de la red y con ello realizar el cálculo de los caminos o incluso llevar a cabo una reoptimización cada cierto periodo de tiempo.

7.2 Trabajo futuro

En cuanto al encaminamiento de las rutas de trabajo se propone como trabajo futuro:

- Optimización de la asignación de longitud de onda de forma conjunta a la optimización de ruta.
- Hacer el proceso dinámico para que en caso de que no sea posible asignar una de las 80 longitudes de onda al camino, buscar otro camino hasta que se encuentre una disponible para retrasar el despliegue de nuevas fibras.
- También sería viable introducir el concepto de multifibra consistente en añadir una nueva fibra cada vez que se superen las 80 longitudes de onda de la fibra anterior.
- Como problema completo, se propone añadir una función de coste de tal forma que el nuevo objetivo a conseguir sea la minimización del coste total de la red.
- Comparar los resultados obtenidos para diferentes topologías de red.

En relación con la protección y la restauración se propone:

- Implementación de esquemas de mayor complejidad como por ejemplo protección del 50% de los caminos de trabajo y restauración de todos (tanto de trabajo como de supervivencia) cuando exista un fallo en la red.

Y por último, en cuanto a las restricciones físicas se propone:

- Implementación de un algoritmo que a la vez que encuentra el camino óptimo considerando las limitaciones físicas, también encuentra el emplazamiento óptimo de los regeneradores.
- Introducción en las restricciones del ILP de las contribuciones de otros parámetros físicos que afectan a la señal.
- Introducción del efecto que tiene en la señal luminosa el paso por cada ROADM.
- Estudiar los efectos que se producen para la transmisión a 100 Gbps.

7.3 Publicaciones derivadas de este proyecto

A raíz del algoritmo que tiene en cuenta las restricciones físicas y busca un camino de dos tramos si el *lightpath* necesita regeneración, se ha realizado un artículo titulado “Offline Impairment Aware Routing Algorithm based on ILP formulation using regeneration nodes”, el cual ha sido enviado a la revista “Journal of Optical Communications and Networking” y del que está pendiente su publicación.

Por otro lado, el tiempo de trabajo en Telefónica I+D ha permitido avanzar en el estudio de los algoritmos de optimización lineal y en el artículo “Cost comparison of different optical network planning algorithms” enviado al NOC2010 se ha propuesto un ILP que optimiza tanto el encaminamiento como la asignación de longitud de onda y cuyo objetivo es minimizar el número de fibras totales en la red.

Glosario

ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
ASE	Amplifier Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DCM	Dispersion Compensation Module
DGD	Differential Group Delay
DMC	Dense Multi-Carrier
DPSK	Differential Phase Shifting Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shifting Keying
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FC	Filter Concatenation
FF	First Fit
FTTX	Fiber To The X
FWM	Four Wave Mixing
ILP	Integer Linear Program
ISI	InterSymbol Interference
JDS	Jerarquía Digital Síncrona
LP	Linear Program
MILP	Mixed Integer Linear Program
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPLS-TE	MPLS Traffic Engineering
NF	Noise Figure
NRZ	Non-Return-To-Zero
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OBS	Optical Burst Switching
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio

OTN	Optical Transport Network
PBB	Provider Backbone Bridging
PBB-TE	Provider Backbone Bridging Traffic Engineering
PCE	Path Computation Element
PLIA	Physical Layer Impairment Aware
PMD	Polarization Mode dispersion
RD	Residual Dispersion
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RWA	Routing and Wavelength Assignment
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing
SMF	Single Mode Fiber
SP	Shortest Path
SPM	Self Phase Modulation
SRS	Stimulated Raman Scattering
T-MPLS	Transport Multiprotocol Label Switching
VoD	Video on Demand
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switching
XPM	Cross Phase Modulation

Bibliografía

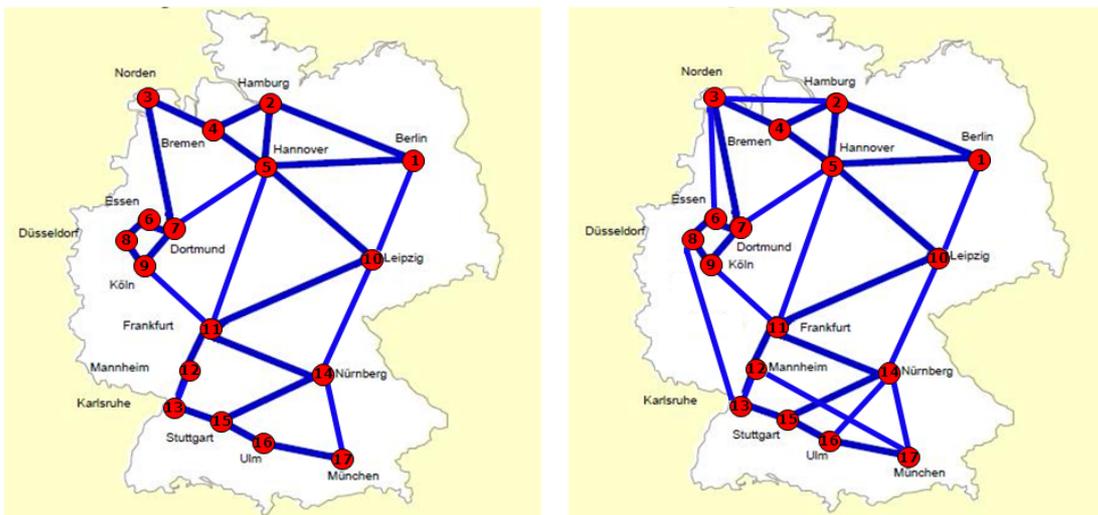
- [1] <http://www.elo.utfsm.cl/~lsb/pascal/clases/cap25.pdf>
- [2] "Cisco Visual Networking Index-Forecast and Methodology 2008-2013", White paper, Cisco.
- [3] J. Linares, "Transformation for delivering sustainable growth," *Telefónica's 7th Investor Conference*, 2009.
- [4] E.I. Rodríguez, "Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Autónoma de Madrid, 2009.
- [5] http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=153603
- [6] http://www.lightreading.com/blog.asp?blog_sectionid=388&doc_id=179180
- [7] T. Battestilli and H. Perros, "An introduction to optical burst switching," *IEEE communications magazine*, vol. 41, 2003, p. S10–S15.
- [8] J. Enríquez Gabeiras, V. López, J. Aracil, J.P. Fernández-Palacios, C. García Argos, Ó. González De Dios, F.J. Jiménez Chico, and J.A. Hernández, "Is multilayer networking feasible?," *Optical Switching and Networking*, vol. 6, 2009, pp. 129-140.
- [9] "A performance comparison of WSS switch engine technologies" White paper, JDSU.
- [10] I. de Miguel Jiménez, "Diseño y modelado de redes ópticas con encaminamiento por longitud de onda y conmutación de ráfagas", Tesis doctoral, Valladolid: 2002.
- [11] A. Ozdaglar and D. Bertsekas, "Routing and wavelength assignment in optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, 2003, pp. 259-272.
- [12] M. Alanyali and E. Ayanoglu, "Provisioning algorithms for WDM optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 7, 1999, p. 767–778.
- [13] D. Banerjee and B. Mukherjee, "A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, 1996, pp. 903-908.
- [14] A. Glenstrup, C. Fenger, and T. Stidsen, "Full design of robust optical networks," *Fifteenth Nordic Teletraffic Seminar*, Citeseer, 2000, p. 11–21.
- [15] H. Zang, J.P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Most*, 1999, pp. 1-25.
- [16] J.S. Choi, N. Golmie, F. Lapeyrere, F. Mouveaux, D. Su, A. Network, T. Division, and C. Engineering, "A Functional Classification of Routing and Wavelength Assignment Schemes in DWDM networks: Static Case," *Elements*, pp. 1-8.
- [17] A. Todimala and B. Ramamurthy, "Congestion-based algorithms for online routing in optical WDM mesh networks," *IASTED International Conference on Communications, Internet, and Information Technology (CIIT'03)*, 2003, p. 43–48.
- [18] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 4, 1996, p. 684–696.

- [19] J. Skorin-Kapov, D. Skorin-Kapov, and V. Boljunčić, "On Management of Optical Networks: Utilization versus Cost," *na-businesspress.com*, pp. 53-65.
- [20] R.N. Lao and R.I. Killey, "Design of Wavelength-Routed Optical Network Topologies to Minimise Lightpath Blocking Probabilities," *Distribution*, pp. 0-3.
- [21] M. Tornatore, G. Maier, and A. Pattavina, "WDM Network Optimization by ILP Based on Source Formulation," *Proceedings, IEEE INFOCOM '02, June, 2002*.
- [22] "Communication Networks" Chapter 2 Network Planning and Optimization.
- [23] <http://www.programacionlineal.net/>
- [24] <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>
- [25] <http://www.ampl.com/>
- [26] <http://www.ilog.com/products/cplex/>
- [27] <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/lp-format.htm>
- [28] <http://www.w3.org/standards/xml/>
- [29] D.a. Schupke and R.G. Prinz, "Capacity Efficiency and Restorability of Path Protection and Rerouting in WDM Networks Subject to Dual Failures," *Photonic Network Communications*, vol. 8, 2004, pp. 191-207.
- [30] M. German, A. Castro, X. Masip-Bruin, M. Yannuzzi, R. Martínez, R. Casellas and R. Muñoz, "On the challenges of finding two link- disjoint lightpaths of minimum total weight across an optical network". *NOC/OC&I 2009 Proceedings*, pp. 217-224.
- [31] G. Maier, A. Pattavina, and M. Tornatore, "Variable Aggregation in the ILP Design of WDM Networks with Dedicated Protection," *networks.cs.ucdavis.edu*.
- [32] R. Iraschko and W. Grover, "A highly efficient path-restoration protocol for management of optical network transport integrity," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, 2000, pp. 779-794.
- [33] C. Mas and P. Thiran, "A review on fault location methods and their application to optical networks," *Optical Networks Magazine*, vol. 2, 2001, p. 73-87.
- [34] C. Mas, H. Nguyen, and P. Thiran, "Failure location in WDM networks," *Optical WDM Networks: Past Lessons and Path Ahead. Kluwer Academic Publishers*, 2004.
- [35] H. Choi, H. Choi, and S. Subramaniam, "Fast Restoration in WDM Mesh Networks," *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL ALLERTON CONFERENCE ON COMMUNICATION CONTROL AND COMPUTING*, The University; 1998, 2002, p. 946-955.
- [36] S. Azodolmolky, M. Klinkowski, E. Marin, D. Careglio, J.S. Pareta, and I. Tomkos, "A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks," *Elsevier Computer Networks*, 2009.
- [37] O. In, "Integrated Design and Operation of a Transparent Optical Network: A Systematic Approach to Include Physical Layer Awareness and Cost Function," *IEEE Communications Magazine*, 2007, pp. 40-47.
- [38] Concept paper of DICONET.
- [39] I. Tomkos, "Q-factor-based constraint routing improves performance in optical networks," *SPIE Newsroom*, 2006.
- [40] H. Nolting, "All-optical 3R-regeneration for photonic networks," *ONDM 2003: Proceedings of the 7th IFIP Working Conference on Optical Network Design \& Modelling*, 2003, pp. 3-5.
- [41] S. Pachnicke, T. Paschenda, and P.M. Krummrich, "Physical Impairment Based Regenerator Placement and Routing in Translucent Optical Networks," *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008, pp. 1-3.

- [42] K. Manousakis, K. Christodoulopoulos, E. Kamitsas, I. Tomkos, and E.a. Varvarigos, "Offline Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Translucent WDM Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, 2009, pp. 1866-1877.
- [43] Y. Ye, T. Chai, T. Cheng, and C. Lu, "Algorithms for the design of WDM translucent optical networks," *Optics express*, vol. 11, 2003, pp. 2917-26.
- [44] E. Yetginer and E. Karasan, "Regenerator Placement and Traffic Engineering with Restoration in GMPLS Networks," *Network*, 2003, pp. 139-149.
- [45] A. Gumaste and T. Antony, "DWDM Network Designs and Engineering Solutions," *Cisco Press*, 2002, pp. 109-141.
- [46] N. Zulkifli, C. Okonkwo, and K. Guild, "Dispersion Optimised Impairment Constraint Based Routing and Wavelength Assignment Algorithms for All-Optical Networks," *2006 International Conference on Transparent Optical Networks*, 2006, pp. 177-180.
- [47] E. Dirk, "Robust Optical Transmission Systems: modulation and equalization," Eindhoven, 2008.
- [48] S.A. Zahr, M. Gagnaire, N. Puech, and M.K. Aa, "Physical Layer Impairments in WDM Core Networks: a Comparison between a North-American Backbone and a Pan-European Backbone," *Lightwave*.
- [49] Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," *Elsevier*, 2007.
- [50] A. Aguilar, "Tema 3: La fibra óptica," *Comunicaciones Ópticas*, 2009, <http://arantxa.ii.uam.es/~aaguilar/ComOpt/TEMAS/Tema03.pdf>
- [51] V. López, B. Huiszoon, J. Fernández-Palacios, O. González and J. Aracil, "Path Computation Element in Telecom Networks: Recent Developments and Standardization Activities," *Optical Networking Design and Modeling*, 2010.

Anexos

En las siguientes secciones se van a presentar los resultados de las planificaciones para la obtención de los caminos de trabajo, los de protección y los de trabajo considerando las restricciones físicas. En concreto se muestran unas listas con los lightpaths derivados de la demanda estimada (107 lightpaths en total) y a continuación una lista con los identificadores de los nodos que forman la ruta. Como recordatorio, las dos topologías utilizadas para las planificaciones son las siguientes:



A la derecha tenemos la topología utilizada para la planificación de los caminos de trabajo tanto para los algoritmos que no tienen en cuenta las limitaciones físicas como aquellos que sí las tienen, además de los algoritmos que calculan los caminos de protección 1+1 y restauración con fallo simple. A la izquierda, la topología utilizada en caso de fallo doble.

A. Planificaciones de los caminos de trabajo

A.1. ILP individual

1	1-2
2	1-2
3	1-2
4	1-2
5	1-2
6	1-5-7-6-8
7	1-2-4-5-7-6-8
8	1-5-7-6-8
9	1-5-7-9-8
10	1-10-11
11	1-5-11
12	1-5-11
13	1-5-11
14	1-10-14-11
15	1-10-11
16	1-10-11
17	1-10-14-15
18	1-10-14-15
19	1-10-14-15
20	1-5-11-10-14-15
21	1-2-4-3-7-5-10-14-15
22	2-5
23	2-5
24	2-5
25	2-4-5
26	2-4-5
27	2-4-5
28	2-4-5-10
29	2-4-3-7-5-1-10
30	2-5-11-10
31	2-5-1-10
32	2-5-1-10
33	2-5-1-10
34	2-5-1-10
35	4-5-10
36	4-5-11-12-13-15-16-17-14-10
37	4-3-7-5-10
38	4-5-10
39	5-10-11-12-13-15
40	5-11-14-17-16-15
41	5-10-14-15
42	5-10-14-15
43	5-11-14-15
44	6-7-5-10
45	6-7-3-4-2-1-5-11-10
46	6-7-9-11-10
47	6-7-3-4-2-1-5-10
48	6-8-9-11
49	6-7-5-10-11
50	6-7-9-11
51	6-7-9-11

A.2. SP

1	1-2
2	1-2
3	1-2
4	1-2
5	1-2
6	1-5-7-6-8
7	1-5-7-6-8
8	1-5-7-6-8
9	1-5-7-6-8
10	1-10-11
11	1-10-11
12	1-10-11
13	1-10-11
14	1-10-11
15	1-10-11
16	1-10-11
17	1-10-14-15
18	1-10-14-15
19	1-10-14-15
20	1-10-14-15
21	1-10-14-15
22	2-5
23	2-5
24	2-5
25	2-5
26	2-5
27	2-5
28	2-5-10
29	2-5-10
30	2-5-10
31	2-5-10
32	2-5-10
33	2-5-10
34	2-5-10
35	4-5-10
36	4-5-10
37	4-5-10
38	4-5-10
39	5-11-12-13-15
40	5-11-12-13-15
41	5-11-12-13-15
42	5-11-12-13-15
43	5-11--12-13-15
44	6-7-5-10
45	6-7-5-10
46	6-7-5-10
47	6-7-5-10
48	6-8-9-11
49	6-8-9-11
50	6-8-9-11
51	6-8-9-11

52	7-3-4-5-10
53	7-5-10
54	7-5-1-10
55	7-5-10
56	7-9-11-12-13-15-16-17-14-10
57	7-9-11
58	7-9-11
59	7-9-11
60	7-9-11
61	7-5-10-11
62	8-9-11
63	8-9-11
64	8-9-7-3-4-5-10-11
65	8-9-11
66	8-9-11
67	8-6-7-5-11
68	9-11-12-13-15
69	9-11-14-17-16-15
70	9-11-12-13-15
71	9-7-3-4-5-10-14-17-16-15
72	10-14-15
73	10-11-12-13-15
74	10-14-15
75	10-14-17-16-15
76	10-14-15
77	10--14-15
78	10-14-17-16-15
79	11-9-8-6-7-3-4-2
80	11-10-1-2
81	11-5-4-2
82	11-10-1-2
83	11-10-1-2
84	11-5-2
85	11-5
86	11-5
87	11-5
88	11-5
89	11-5
90	11-10-5
91	11-5
92	11-10-5-7-9
93	11-9
94	11-10-1-5-7-9
95	11-5-7-9
96	11-9
97	11-10-1-5-7-9
98	11-12-13-15
99	11-14-17-16-15
100	11-14-15
101	11-12-13-15
102	11-14-15
103	11-10-14-15
104	11-12-13-15
105	14-10-1
106	17-14-11-5-1-2
107	17-16-15-14-10-1-2

52	7-5-10
53	7-5-10
54	7-5-10
55	7-5-10
56	7-5-10
57	7-9-11
58	7-9-11
59	7-9-11
60	7-9-11
61	7-9-11
62	8-9-11
63	8-9-11
64	8-9-11
65	8-9-11
66	8-9-11
67	8-9-11
68	9-11-12-13-15
69	9-11-12-13-15
70	9-11-12-13-15
71	9-11-12-13-15
72	10-14-15
73	10-14-15
74	10-14-15
75	10-14-15
76	10-14-15
77	10-14-15
78	10-14-15
79	11-5-2
80	11-5-2
81	11-5-2
82	11-5-2
83	11-5-2
84	11-5-2
85	11-5
86	11-5
87	11-5
88	11-5
89	11-5
90	11-5
91	11-5
92	11-9
93	11-9
94	11-9
95	11-9
96	11-9
97	11-9
98	11-12-13-15
99	11-12-13-15
100	11-12-13-15
101	11-12-13-15
102	11-12-13-15
103	11-12-13-15
104	11-12-13-15
105	14-10-1
106	17-14-10-5-2
107	17-14-10-5-2

B. Planificaciones considerando supervivencia en la red

B.1. ILP conjunto

1	1-5-2
2	1-5-2
3	1-5-2
4	1-5-2
5	1-5-2
6	1-10-11-9-8
7	1-10-11-9-8
8	1-10-11-9-8
9	1-10-11-9-8
10	1-10-11
11	1-10-11
12	1-10-11
13	1-10-11
14	1-10-11
15	1-10-11
16	1-10-11
17	1-10-14-15
18	1-10-14-15
19	1-10-14-15
20	1-10-14-15
21	1-10-14-15
22	2-5
23	2-5
24	2-5
25	2-5
26	2-5
27	2-5
28	2-1-10
29	2-1-10
30	2-1-10
31	2-1-10
32	2-1-10
33	2-1-10
34	2-1-10
35	4-2-1-10
36	4-2-1-10
37	4-2-1-10
38	4-2-1-10
39	5-11-12-13-15
40	5-11-12-13-15
41	5-11-12-13-15
42	5-11-12-13-15
43	5-11-12-13-15
44	6-8-9-11-10
45	6-8-9-11-10
46	6-8-9-11-10
47	6-8-9-11-10
48	6-7-5-10-14-11
49	6-7-5-10-14-11
50	6-7-5-10-14-11
51	6-7-5-10-14-11

B.2. ILP camino disjunto

1	1-5-4-2
2	1-5-2
3	1-5-2
4	1-5-4-2
5	1-5-2
6	1-10-11-9-8
7	1-10-11-9-8
8	1-10-11-9-8
9	1-10-11-9-8
10	1-5-11
11	1-5-11
12	1-5-11
13	1-5-11
14	1-5-11
15	1-5-11
16	1-5-11
17	1-5-11-12-13-15
18	1-5-11-12-13-15
19	1-5-11-12-13-15
20	1-5-11-12-13-15
21	1-5-11-12-13-15
22	2-1-5
23	2-4-5
24	2-4-3-7-5
25	2-4-5
26	2-1-5
27	2-4-5
28	2-4-3-7-9-11-10
29	2-1-10
30	2-1-10
31	2-4-3-7-9-11-10
32	2-1-10
33	2-1-10
34	2-1-10
35	4-2-1-10
36	4-2-1-10
37	4-2-1-10
38	4-2-1-10
39	5-10-14-15
40	5-10-14-15
41	5-10-14-15
42	5-10-14-15
43	5-10-14-15
44	6-8-9-11-10
45	6-8-9-11-12-13-15-14-10
46	6-8-9-11-10
47	6-8-9-11-10
48	6-7-3-4-5-11
49	6-7-5-11
50	6-7-3-4-2-5-11
51	6-7-3-4-5-11

B.3. SP

1	1-5-2
2	1-5-2
3	1-5-2
4	1-5-2
5	1-5-2
6	1-10-11-9-8
7	1-10-11-9-8
8	1-10-11-9-8
9	1-10-11-9-8
10	1-5-11
11	1-5-11
12	1-5-11
13	1-5-11
14	1-5-11
15	1-5-11
16	1-5-11
17	1-5-11-12-13-15
18	1-5-11-12-13-15
19	1-5-11-12-13-15
20	1-5-11-12-13-15
21	1-5-11-12-13-15
22	2-4-5
23	2-4-5
24	2-4-5
25	2-4-5
26	2-4-5
27	2-4-5
28	2-1-10
29	2-1-10
30	2-1-10
31	2-1-10
32	2-1-10
33	2-1-10
34	2-1-10
35	4-2-1-10
36	4-2-1-10
37	4-2-1-10
38	4-2-1-10
39	5-10-14-15
40	5-10-14-15
41	5-10-14-15
42	5-10-14-15
43	5-10-14-15
44	6-8-9-11-10
45	6-8-9-11-10
46	6-8-9-11-10
47	6-8-9-11-10
48	6-7-5-11
49	6-7-5-11
50	6-7-5-11
51	6-7-5-11

52	7-9-11-14-10
53	7-9-11-14-10
54	7-9-11-14-10
55	7-9-11-14-10
56	7-9-11-14-10
57	7-9-11
58	7-9-11
59	7-9-11
60	7-9-11
61	7-9-11
62	8-6-7-5-11
63	8-6-7-5-11
64	8-6-7-5-11
65	8-6-7-5-11
66	8-6-7-5-11
67	8-6-7-5-11
68	9-11-12-13-15
69	9-11-12-13-15
70	9-11-12-13-15
71	9-11-12-13-15
72	10-14-15
73	10-14-15
74	10-14-15
75	10-14-15
76	10-14-15
77	10-14-15
78	10-14-15
79	11-5-4-2
80	11-5-4-2
81	11-5-4-2
82	11-5-4-2
83	11-5-4-2
84	11-5-4-2
85	11-5
86	11-5
87	11-5
88	11-5
89	11-5
90	11-5
91	11-5
92	11-9
93	11-9
94	11-9
95	11-9
96	11-9
97	11-9
98	11-12-13-15
99	11-12-13-15
100	11-12-13-15
101	11-12-13-15
102	11-12-13-15
103	11-12-13-15
104	11-12-13-15
105	14-11-9-7-5-1
106	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2
107	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2

52	7-9-11-10
53	7-3-4-2-1-10
54	7-9-11-10
55	7-9-11-10
56	7-9-11-14-10
57	7-3-4-5-10-14-11
58	7-3-4-2--1-10-11
59	7-3-4-2-5-11
60	7-5-11
61	7-3-4-2-1-10-14-11
62	8-6-7-3-4-2-5-11
63	8-6-7-5-11
64	8-6-7-5-11
65	8-6-7-3-4-2-1-5-11
66	8-6-7-5-11
67	8-6-7-3-4-5-11
68	9-7-5-10-14-15
69	9-7-5-10-14-15
70	9-7-5-2-1-10-14-15
71	9-7-3-4-5-10-14-15
72	10-11-12-13-15
73	10-11-12-13-15
74	10-11-12-13-15
75	10-11-12-13-15
76	10-11-12-13-15
77	10-11-12-13-15
78	10-11-12-13-15
79	11-10-1-2
80	11-10-1-2
81	11-10-1-2
82	11-10-1-2
83	11-10-1-2
84	11-10-1-2
85	11-10-5
86	11-10-5
87	11-9-7-5
88	11-10-1-5
89	11-10-1-5
90	11-14-10-1-5
91	11-10-1-5
92	11-14-10-1-2-4-3-7-9
93	11-5-7-9
94	11-5-2-4-3-7-9
95	11-5-7-9
96	11-10-1-2-4-3-7-9
97	11-14-10-5-7-9
98	11-10-14-15
99	11-14-15
100	11-10-14-15
101	11-10-14-15
102	11-10-14-15
103	11-10-14-15
104	11-14-15
105	14-11-5-1
106	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2
107	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2

52	7-9-11-10
53	7-9-11-10
54	7-9-11-10
55	7-9-11-10
56	7-9-11-10
57	7-5-11
58	7-5-11
59	7-5-11
60	7-5-11
61	7-5-11
62	8-6-7-5-11
63	8-6-7-5-11
64	8-6-7-5-11
65	8-6-7-5-11
66	8-6-7-5-11
67	8-6-7-5-11
68	9-7-5-10-14-15
69	9-7-5-10-14-15
70	9-7-5-10-14-15
71	9-7-5-10-14-15
72	10-11-12-13-15
73	10-11-12-13-15
74	10-11-12-13-15
75	10-11-12-13-15
76	10-11-12-13-15
77	10-11-12-13-15
78	10-11-12-13-15
79	11-10-1-2
80	11-10-1-2
81	11-10-1-2
82	11-10-1-2
83	11-10-1-2
84	11-10-1-2
85	11-9-7-5
86	11-9-7-5
87	11-9-7-5
88	11-9-7-5
89	11-9-7-5
90	11-9-7-5
91	11-9-7-5
92	11-5-7-9
93	11-5-7-9
94	11-5-7-9
95	11-5-7-9
96	11-5-7-9
97	11-5-7-9
98	11-14-15
99	11-14-15
100	11-14-15
101	11-14-15
102	11-14-15
103	11-14-15
104	11-14-15
105	14-11-5-1
106	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2
107	17-16-15-13-12-11-9-7-3-4-2

C. Planificaciones considerando restricciones físicas

C.1. Circuitos de 10Gbps

1	1-2
2	1-2
3	1-2
4	1-2
5	1-2
6	1-5-7-6-8
7	1-5-7-6-8
8	1-5-7-6-8
9	1-2-5-7-6-8
10	1-5-10-11
11	1-10-14-11
12	1-2-5-10-14-11
13	1-5-10-11
14	1-5-10-11
15	1-5-10-11
16	1-10-14-11
17	1-5-11-14-15
18	1-5-11-14-15
19	1-5-11-12-13-15
20	1-5-11-12-13-15
21	1-5-11-12-13-15
22	2-5
23	2-5
24	2-5
25	2-5
26	2-5
27	2-5
28	2-4-5-1-10
29	2-5-1-10
30	2-1-5-11-10
31	2-1-10
32	2-5-10
33	2-1-10
34	2-1-10
35	4-2-1-10
36	4-5-10
37	4-5-10
38	4-2-1-10
39	5-10-11-12-13-15
40	5-7-9-11-12-13-15
41	5-11-12-13-15
42	5-1-10-14-15
43	5-11-12-13-15
44	6-7-9-11-10
45	6-7-3-4-2-5-11-10
46	6-7-5-1-10
47	6-7-5-10
48	6-7-5-11
49	6-7-5-10-11
50	6-7-9-11
51	6-8-9-11
52	7-5-1-10

C.2. Circuitos de 40Gbps

1	1-2
2	1-2
3	1-2
4	1-2
5	1-2
6	1-2-4-5-7-6-8
7	1-5-7-9-8
8	1-2-5-7-6-8
9	1-5-7-9-8
10	1-5-10-14-11
11	1-5-11
12	1-10-14-11
13	1-5-11
14	1-10-11
15	1-10-11
16	1-5-11
17	1-10-11-12-13-15
18	1-10-14-15
19	1-10-14-15
20	1-10-14-11-12-13-15
21	1-10-14-15
22	2-5
23	2-4-5
24	2-4-5
25	2-5
26	2-5
27	2-5
28	2-5-10
29	2-1-10
30	2-1-10
31	2-1-5-10
32	2-1-10
33	2-5-10
34	2-1-10
35	4-5-10
36	4-2-1-10
37	4-2-5-10
38	4-2-5-10
39	5-11-12-13-15
40	5-11-12-13-15
41	5-11-14-15
42	5-1-10-11-14-15
43	5-10-11-12-13-15
44	6-7-9-11-14-10
45	6-7-3-4-2-5-11-10
46	6-7-5-10
47	6-7-5-10
48	6-7-5-11
49	6-7-5-11
50	6-7-5-11
51	6-7-9-11
52	7-5-10

53	7-9-11-10
54	7-5-1-10
55	7-3-4-5-10
56	7-5-10
57	7-5-11
58	7-5-1-10-11
59	7-5-11
60	7-5-11
61	7-5-11
62	8-6-7-3-4-5-10-11
63	8-6-7-9-11
64	8-9-11
65	8-9-11
66	8-9-11
67	8-9-11
68	9-11-12-13-15
69	9-11-12-13-15
70	9-11-10-14-15
71	9-11-12-13-15
72	10-14-15
73	10-14-15
74	10-14-17-16-15
75	10-14-15
76	10-14-15
77	10-14-17-16-15
78	10-14-15
79	11-5-2
80	11-5-2
81	11-14-10-5-2
82	11-5-2
83	11-5-2
84	11-5-2
85	11-5
86	11-5
87	11-5
88	11-5
89	11-5
90	11-5
91	11-5
92	11-9
93	11-9
94	11-9
95	11-9
96	11-9
97	11-9
98	11-14-15
99	11-14-15
100	11-14-15
101	11-12-13-15
102	11-14-17-16-15
103	11-12-13-15
104	11-14-15
105	14-11-9-8-6-7-5-1
106	17-14-11-10-1-2
107	17-14-11-10-1-2

53	7-5-10
54	7-5-10
55	7-5-10
56	7-9-11-10
57	7-9-11
58	7-3-4-5-11
59	7-5-11
60	7-9-11
61	7-5-11
62	8-9-11
63	8-9-7-5-11
64	8-9-11
65	8-6-7-9-11
66	8-9-11
67	8-6-7-9-11
68	9-11-14-15
69	9-11-12-13-15
70	9-11-14-15
71	9-11-14-17-16-15
72	10-14-15
73	10-14-17-16-15
74	10-14-15
75	10-14-15
76	10-11-12-13-15
77	10-14-15
78	10-14-17-16-15
79	11-5-2
80	11-9-8-6-7-5-2
81	11-5-2
82	11-5-2
83	11-10-1-2
84	11-5-2
85	11-5
86	11-5
87	11-10-1-5
88	11-5
89	11-14-10-5
90	11-5
91	11-5
92	11-5-7-6-8-9
93	11-9
94	11-9
95	11-9
96	11-9
97	11-9
98	11-14-17-16-15
99	11-14-15
100	11-12-13-15
101	11-14-15
102	11-14-15
103	11-14-17-16-15
104	11-12-13-15
105	14-11-5-1
106	17-14-10-11-5-2
107	17-14-11-10-5-2

PRESUPUESTO

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal 1.000 €
- Software necesario (Matlab, CPLEX)..... 3000 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
- Material de oficina 150 €
- Total de ejecución material 4.200 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material 672 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 252 €

4) Honorarios Proyecto

- 840 horas a 15 € / hora..... 12600 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 100 €
- Encuadernación..... 150 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 17974 €

7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto 2875.84 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 20849,84 €

Madrid, Mayo de 2010

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Noemi Gutiérrez Aller
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de los “Algoritmos de planificación de redes ópticas troncales”. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

Cost Comparison of Different Optical Network Planning Algorithms

Óscar González de Dios¹, Noemi Gutiérrez Aller¹, Javier Jiménez¹, Raúl Duque, Sidnei de Oliveira Guerra², Enrique Pérez

¹ Dpt. of Photonic Networks, Telefónica I+D, Madrid, Spain
Tel: +34 91 3374013, E-mail: ogondio@tid.es

² Dpt. of Techno-Economic Analyses and Performance, Telefónica I+D, Madrid, Spain
Tel: +34 91 3374496, E-mail: sidnei@tid.es

Due to the huge increase of the traffic during the last years and the studies that foresee that it will continue growing, DWDM networks have been objective of intense research in order to take advantage of all the capacity that fiber optics provide. Especially interesting for operators are ROADM WSS based networks. The goal of this study is to compare different optical network planning algorithms in terms of CAPEX savings. On one hand the economic benefits of a proper multi-fiber wavelength assignment is analyzed. On the other hand, the CAPEX savings when an optimization of the routing and wavelength assignment is jointly performed is quantified. The main contribution of this study is therefore to quantify their benefits from an economic perspective.

Introduction

Numerous studies of traffic evolution foresee a huge growth for the next years. Especially well known are the Cisco Systems analyses [1], which state that “*Globally, mobile data traffic will double every year through 2014, increasing 39 times between 2009 and 2014*” and “*Global IP traffic will quintuple from 2008 to 2013*”. Optical DWDM networks are a key element to support this expected huge traffic demand. Currently, WSS based ROADM DWDM networks are being deployed to cope with the demand. For this reason, operators are willing to optimize the use of the available capacity of the new networks, in order to postpone as much as possible any additional investment.

In order to best use the available resources, a good network planning is essential. Two principal tasks have to be carried out: the first one is the calculation of the sequence of nodes and links that constitute the path that will follow the signal and the second corresponds to the search of a free wavelength between all the wavelengths of the fibres in the calculated path. The whole problem is known as the RWA problem that is “*Routing and Wavelength Assignment*”.

Many algorithms to solve this problem have been proposed in the literature for years, with uncountable different objectives, such as to minimize the transmission delay [2], to minimize the congestion and the cost [3] or to maximize the number of established connections [4]. But the real important target for an operator is to postpone future investments and to provide services without blocking probability. .

All the routing algorithms proposed can be generally divided in two groups: heuristic and Linear Programming (LP) based algorithms. In problem solving theory, an algorithm is heuristic when the solution is not determined in a direct way but by tests and trials. Specifically we have considered the Shortest Path First (SPF), which finds the shortest paths (according to a given measure) between the source and the destination nodes. This algorithm is one of the most commonly used heuristics to reduce the links usage, since it ensures that the traffic will minimize the number of links (or the distance) it transverses. The approach is different when considering the LP-based algorithms, where you can define the objective. In [5] a Linear Program is described as “*a mathematical model, in which the aim is to find a set of non-negative values for the unknowns or variables which maximize or minimize a linear equation or objective function, whilst satisfying a system of linear constraints*”. In this paper, we have chosen to minimize the total number of additional fibers that need to be deployed whenever an eighty wavelengths limit per fiber is surpassed, as the deployment of a new fiber link is the major source of investment (activation of new fiber, amplifiers, upgrade of WSS in ROADMs...).

One of the goals of the paper is to evaluate the impact of a proper wavelength assignment. Regarding the wavelength assignment, [6] provides a detailed description of several heuristic algorithms for the resolution of this problem. To mention some examples, the authors describe the Random (R), First-Fit (FF), Least-Used (LU) and Most-Used (MU) algorithms. Another important technique for the wavelength assignment is the “Graph Colouring” [7]. In our study we have used the FF algorithm, that selects the lower-numbered wavelength, since it performs well in terms of blocking probability, fairness and complexity, and then we have then compared it to an ILP based optimization.

In summary, in this paper we made a techno-economic evaluation first, of the impact of wavelength assignment and second, of the use of an optimized multi-fiber RWA in comparison to a SPF approach. The techno-economic analysis consists on two steps: the first dimensions network with the given algorithm, topology and traffic demand while the second step carries out the economic analysis taking into account the number of fibers per link, transponders, amplifiers, configuration of the ROADMs, etc. Based on this analysis, CAPEX savings are quantified and the importance of each process can be determined.

Description of the algorithms

The aim of this section is to describe the procedure for the planning algorithms that have been considered.

The first approach performs the routing and wavelength assignment problems separately. Regarding the routing, a shortest path approach is followed. “*In graph theory, the Shortest Path problem is the problem of finding a path between two vertices such that the sum of the weights of its constituent edges is minimized*”. So the problem consists on finding the minimum path, in relation to the distance, between the source node and the destination node. Therefore, for each lightpath of the given demand there will be a set of links forming the path where the path distance is the minimum between each pair source-destination. Finally, the wavelength assignment algorithm is based on First-Fit (FF) algorithm modified to

consider multifiber. New fibers will be deployed in the links that fail to have a wavelength available.

The second approach consists on an ILP that obtains the path, wavelength and fiber. The reader is referred to [8] and [9] to see examples of approaches to the multifiber problem. The ILP formulation needs variables for each circuit, path, and wavelength. The solving time and the computational complexity that this approach involves have led us to reduce the problem by looking first for the k shortest paths for each circuit. The objective of the ILP is to minimize the number of fibers of the entire network. To describe the proposed algorithm, the follow notation is needed:

L , represents the identification number of a lightpath.

E , denotes each link of the network.

C , represents each circuit where $1 \leq C \leq k$, with k representing the total number of pre-calculated circuits. A circuit consists on a set of links.

λ , denotes the wavelengths, $1 \leq \lambda \leq 80$.

$F_{LC\lambda}$, binary variable representing a given lightpath L , circuit C and wavelength λ . If this variable is '1', it means that L is routed through C over λ .

NT_E , denotes the total number of lightpaths assigned in link E . It can also be seen as the number of fibers needed on each link E . This variable is integer.

NT_{\max} , is the number of fibers of the entire network. This variable is integer.

Minimize: NT_{\max}

Subject to:

$$F_{LC\lambda} \in \{0,1\} \quad NT_{\max} \geq \sum_E NT_E \quad (1) \quad \sum_{C,\lambda} F_{LC\lambda} = 1, \quad \forall L \quad (2) \quad \sum_{L,C} F_{LC\lambda} \leq NT_E, \quad \forall E \subset C, \quad \forall \lambda \quad (3)$$

Constraint (1) indicates that NT_{\max} is the sum of all the number of fibers of the entire network. Constraint (2) forces the selection of only one route (consisting in one path between the k possible paths and one wavelength among the 80 possible wavelengths) for a given lightpath L . Constraint (3) defines the multifiber property, that is, NT_E limits the number of times a given wavelength can be assigned in each link.

Economic model description

The economic analysis has been performed through a bottom-up cost model, which builds up the network based on the results given by the execution of the algorithms in a third-party tool and values the elements deployed in each of the scenarios proposed.

This model determines the equipment required in each node and link of the photonic mesh infrastructure, from the sizing of the ROADMs to the deployment of amplifiers, equalizers and DCMs (Dispersion Compensation Modules) along the links (depending on the length of the route).

Regarding the node architecture, which will be needed for the wavelength assignment and the cost model, we must mention that the basic component to create the ROADM (Fig. 1 shows the architecture of the JDSU's node) is the WSS (Wavelength Selective Switch). A WSS is an optical module with one common port

and other N ports, where a wavelength from the common port can be sent to any of the rest of the ports. The device selects which one of the different wavelengths present in the tributary ports goes to the common port and vice-versa. Therefore, each port blocks and attenuates dynamically certain wavelengths and routes while it switches others. Furthermore, the ROADMs is considered as *colorless* since any wavelength can go to any output. To achieve this, a specific structure for the tributary ports, based on the combination of three WSS stages, is needed.

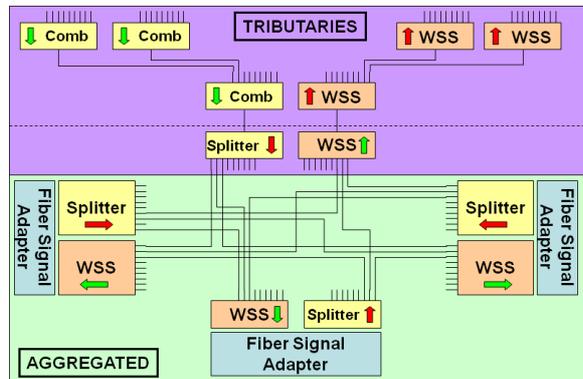


Figure 1: Typical node architecture of a 3 degree WSS enabled node.

Economic impact of the wavelength assignment optimization

In this section the network utilized to carry out the simulations is presented, and the procedure for the estimation of the photonic demand, as well as its evolution in time, is explained. Specifically, the given demand corresponds to year 2010 and its evolution to the estimated demands for 2012, 2014 and 2016.

The reference network that has been used for the simulations of the algorithms is similar to the one presented in [10], except for a few different link distances. It consists on twenty-nine photonic nodes (DWDM equipment) and forty-nine bidirectional links as Fig. 2 shows. The first seven nodes in Fig. 2 are the aggregation nodes of each domain from the seven domains considered in the network.

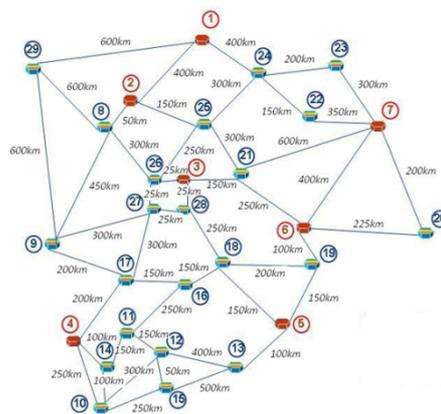


Figure 2: Reference Network.

Based on an estimation of the IP traffic matrix for year 2010, we have derived a traffic matrix for the optical layer.

Furthermore, the traffic matrices for following years are obtained by multiplying the 2010 traffic matrix by a factor of 1.5 each subsequent year [1]. The next table (Table 1) shows the demand of optical circuits for the year 2010 (please note that we have considered a symmetric traffic matrix for our analysis; however, Table 1 only shows the lightpaths in one direction for simplicity) and Fig. 3 the comparison of the number of unidirectional circuits for each year.

From	To	Circuits	From	To	Circuits	From	To	Circuits
1	2	5	3	4	9	10	24	2
1	3	9	3	5	9	10	29	2
1	4	5	3	6	9	12	29	2
1	5	5	4	5	5	13	23	2
1	6	5	4	6	5	14	25	2
1	7	9	4	7	9	15	23	2
2	3	9	5	6	5	16	24	2
2	4	5	5	7	9	17	22	2
2	5	5	6	7	9	20	29	2
2	6	5	8	19	2	29	19	2
2	7	9	9	13	2			

Table 1: Optical demand for 2010 (unidirectional circuits).

Based on these data, we have carried out a comparison between the SPF and the optimization algorithm using $k=1$. According to this value of k , the proposed algorithm acts as SPF in terms of routing (it only considers the shortest path for each demanded circuit) but it optimizes the wavelength assignment (so-called WA optimization in the next parts of the document).

The next figure (Fig. 4) shows the number of new required fibers per year and the savings in this amount of fibers when using WA optimization algorithm. As the traffic demand increases, there are fewer fibers needed with the application of the proposed WA optimization. It can be observed that in the medium term, results around 3% for fiber savings can be achieved.

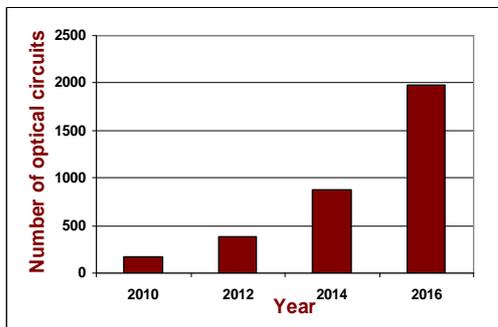


Figure 3: Number of optical circuits for each year.

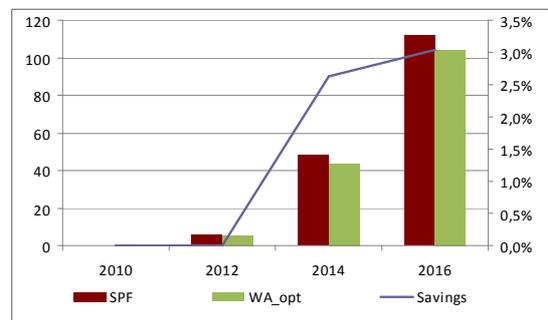


Figure 4: Additional fibers required for each year.

These savings translate into CAPEX savings as can be seen in the next figures. Fig. 5 shows the additional investment required per year, while Fig. 6 depicts the savings that can be reached with the optimization of the wavelength assignment.

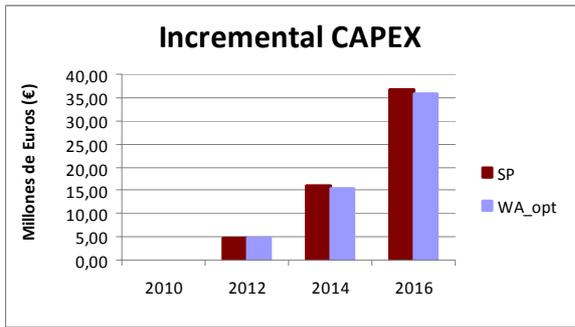


Figure 5: Incremental CAPEX evolution.

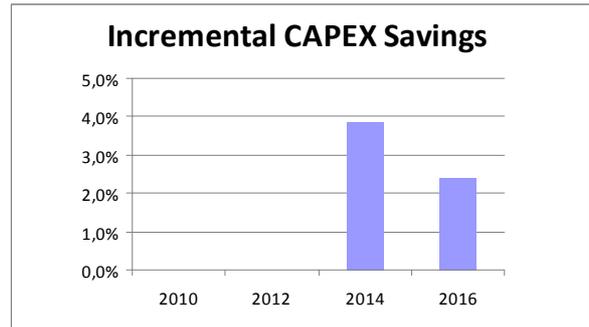


Figure 6: Incremental CAPEX savings evolution.

The results show relatively small savings around 2-4%, but simply by performing a wise lambda planning. As we will see in the following scenario, these savings can be much higher if we allow some routing flexibility to optimize wavelength assignments

Economic impact of the routing and wavelength assignment optimization

The reference scenario used to carry out this analysis is presented in Fig. 7. It is a very simplified version of the one employed in the previous section (Fig. 2) in order to reduce the complexity of the RWA problem.

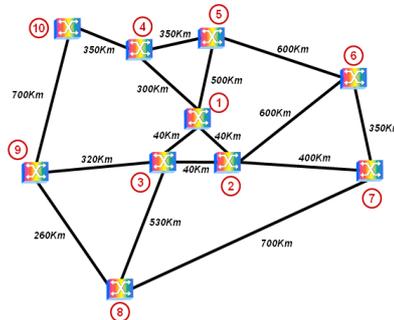


Figure 7: Number of optical unidirectional circuits for each year.

For the traffic demand, each node requests a certain number of lightpaths with the rest of network nodes (i.e., uniform traffic matrix). In 2010, each node demands 2 optical routes. For the following years, the traffic matrices are obtained by multiplying the original traffic matrix by a factor of 1.5 each subsequent year (see the number of demanded optical unidirectional circuits per year in Fig. 8).

Now, we are going to consider more than one possible path between every pair of network nodes, that is, the 'k' parameter is going to be greater than one (i.e., k=4). Therefore, we deal with the RWA problem in a joint way: the solution optimizes at the same time both routing and wavelength assignment for every demanded circuit.

As in the previous section, Fig. 9 shows the number of new fibers to be deployed each year. In 2014, a SPF-based planning algorithm needs new fibers in order to cope with all the traffic demand while the proposed RWA optimization algorithm is able to deal with the same traffic matrix using the existing fiber infrastructure, i.e., no new fibers are needed. Therefore, investment in fiber infrastructure is delayed for

future years. In 2016, the optical circuits demand is greater and both algorithms require the deployment of additional fibers. However, RWA optimization reaches a 25% of saving in fibers.

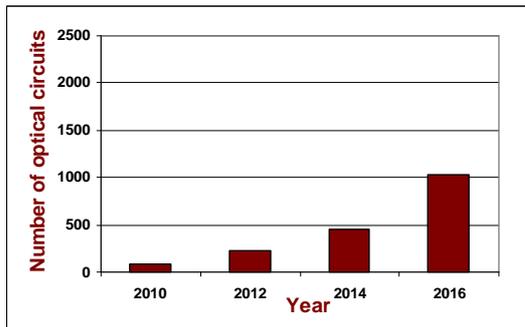


Figure 8: Number of optical circuits for each year

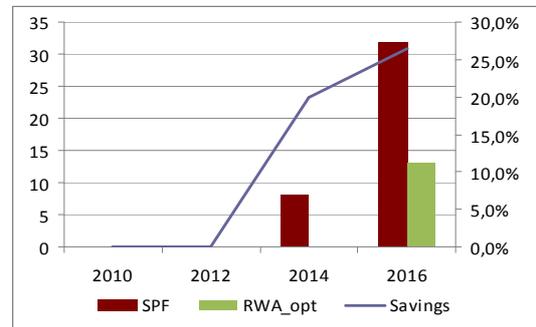


Figure 9: Additional fibers required for each year.

The next figures (Fig. 10 and 11) show the advantages of applying the RWA optimization algorithm in terms of CAPEX. It can be observed that the RWA algorithm provides a 13% cost reduction when compared to the basic SPF. In this scenario, this represents a 2M€ reduction in the network cost. These results are significantly higher than just with the sole optimization of WA.

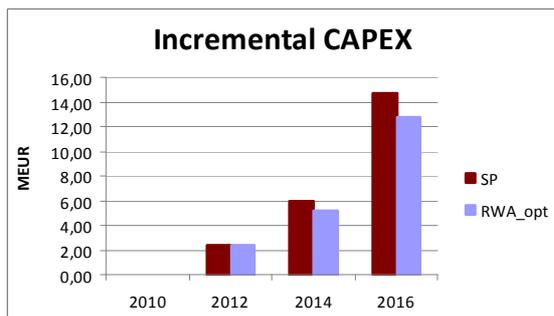


Figure 10: Incremental CAPEX evolution.

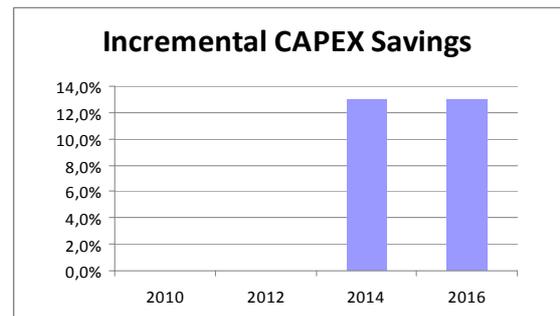


Figure 11: Incremental CAPEX savings evolution.

The proposed RWA algorithm achieves the optimization at the expense of distributing the traffic load. This implies longer routes in comparison to SPF, as can be seen in Fig. 12. Nevertheless, these longer optical paths have no impact on the cost since the regeneration limit (i.e., 2000km) is not exceeded by any of them. However, if we consider a different topology or a greater traffic demand, a number of circuits may surpass the regeneration limit and the associated cost should be taken into account.

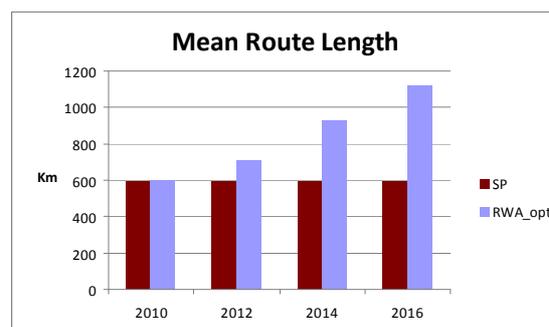


Figure 12: Mean route length.

Conclusion

In this paper we have analyzed and quantified the cost benefits in terms of CAPEX savings of performing an optimized network planning in a multi-fiber photonic network based on colorless and directionless ROADMs.

First of all, just optimizing the wavelength assignment leads to slight savings in the number on newly deployed fiber as the demand increases. In the studied scenario, CAPEX savings up to 4% were achieved.

Next, the benefits of optimizing both routing and wavelength were studied. It was analyzed a technique in which for each demand the routing could choose between k routes (the k shortest paths), so there is a load distribution and free resources can be used. A multi-fiber ILP chooses between these paths and assigns the best wavelength. When using 4 alternative routes, the need of activating new fiber links were reduced to a third. It was demonstrated that a good strategy can postpone new investments. In terms of CAPEX, savings up to 13% were achieved.

Further work will consider further scenarios and investigate different configuration of colorless/directionless/contentionless architectures. On top of that, additional wavelength constraints will be kept in mind. Moreover, further aspects related to OPEX savings will be taken into account, which need to be considered when new links have to be activated and the equipment has to be upgraded.

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme FP7/2007-2013 under grant agreement n°247674.

References

- [1] Cisco Visual Networking Index-Forecast and Methodology 2008-2013.
- [2] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 4, 1996, p. 684–696.
- [3] J. Skorin-Kapov, D. Skorin-Kapov, and V. Boljunčić, "On Management of Optical Networks: Utilization versus Cost," *na-businesspress.com*, pp. 53-65.
- [4] R.N. Lao and R.I. Killey, "Design of Wavelength-Routed Optical Network Topologies to Minimise Lightpath Blocking Probabilities," *Distribution*, pp. 0-3.
- [5] Modern Methods for Modelling of Communication Networks. Part 2: Network Planning and Optimization (2009).
- [6] H. Zang, J.P. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," Most, 1999, pp. 1-25.
- [7] Guangzhi Li and Rahul Simha, "The Partition Coloring Problem and its Application to Wavelength Routing and Assignment", First Workshop on Optical Networks, Dallas, TX, 2000.
- [8] I. de Miguel, et al., "Un Algoritmo Iterativo para Encaminamiento y Asignación de Longitudes de Onda en Redes WDM Multifibra," *OPTOEL*, 2001.
- [9] Z. Wali, K. Elsayed, and A. Hassan, "Static RWA in All-Optical Network under Multifiber, Multiple Requests Assumption," *2006 International Conference on Computer Engineering and Systems*, 2006, pp. 172-177.
- [10] S.O. Guerra, E. Pérez et al., "Economic Analysis for Transport Network Evolution," presented at CTTE 2009, Stockholm, Sweden.