

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**EVALUACIÓN DE PRESTACIONES
DE ALGORITMOS RWA PARA
REDES TODO ÓPTICAS WDM EN
TIEMPO REAL, CONSIDERANDO
RESTRICCIONES FÍSICAS**

Ingeniería de Telecomunicación
Sara Lázaro Olavide

Octubre de 2010

EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE ALGORITMOS RWA PARA REDES TODO ÓPTICAS WDM EN TIEMPO REAL, CONSIDERANDO RESTRICCIONES FÍSICAS

Autora: Sara Lázaro Olavide

Tutor: Óscar González de Dios

Ponente: Francisco Javier Gómez Arribas

Dpto. Ingeniería Informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Octubre de 2010

RESUMEN

En este proyecto se realiza un análisis de requisitos característicos y condicionantes físicos para el cómputo de caminos ópticos o “*lightpaths*” en tiempo real sobre una red óptica de conmutación de circuitos troncal.

Se analiza la viabilidad de algoritmos heurísticos en tiempo real, tanto para las tareas de encaminamiento como para la asignación de longitud de onda (“ λ ”), haciendo clara distinción entre las técnicas clásicas y los nuevos criterios que permiten evaluar la viabilidad física de los “*lightpaths*” establecidos.

Tras la evaluación de requisitos y técnicas pertinente, se presenta una propuesta algorítmica sensible tanto a la necesidad de realizar equilibrado de carga en la red, como al impacto de efectos físicos sobre la señal transmitida.

Para mejorar el alcance de transmisión el algoritmo presentado permitirá el empleo de regeneradores de señal y por lo tanto, el cómputo de rutas en dos tramos.

ABSTRACT

This project analyses the characteristics and physical conditioning factors to compute dynamic lightpaths on a Wavelength-Switched Optical backbone network.

The feasibility of heuristic algorithms is analyzed in real time both for routing tasks and for wavelength assignment (“ λ ”), making a clear distinction between classical techniques and new criteria making it possible to evaluate the physical feasibility of the lightpaths established.

After analyzing the appropriate requirements and techniques, an algorithmic proposal is presented that considers the need for load balancing as well as the impact of the physical effects on the signal transmitted.

To improve the transmission distance reach, the algorithm presented will allow the use of signal regenerators and, therefore, the calculation of routes in two sections.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Óscar por tu generosidad y buena guía que han sido fundamentales para poder realizar este proyecto.

Gracias a todo el equipo de redes fotónicas de Telefónica I+D por vuestro apoyo en el tiempo que hemos compartido. He aprendido mucho de vosotros y sobre todo he disfrutado en un tiempo inolvidable.

Gracias también a todos los amigos y compañeros de Telefónica I+D que sabéis tenéis un hueco en mi corazón.

Gracias a todos los compañeros de la UAM que he conocido a lo largo de los años, por el granito de arena aportado. Muy en especial, gracias a mi cerebro en paralelo Roger, y a mis buenos amigos Noemi y Alex.

Patricia, Teresa y José David gracias por haberme acompañado en cada etapa.

A mis padres gracias por enseñarme a perseverar, y a mis abuelos gracias por los buenos consejos. A Rafael gracias por hacer encajar todas las piezas.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	V
Abstract	V
Agradecimientos	VI
Índice General	VII
Índice de Ilustraciones.....	X
Índice de Tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1 Motivación del Proyecto	1
1.2 Objetivos del Proyecto	6
1.3 Tareas del Proyecto	7
1.4 Estructura de la memoria	7
2. Introducción a las redes fotónicas conmutadas, WSON	10
2.1 Hitos tecnológicos.....	10
2.2 Evolución hacia la transparencia de red.....	11
2.3 Topologías de red.....	13
2.4 Despliegues pioneros	14
2.5 Plano de Control.....	15
2.5.1 Introducción a la arquitectura IP sobre WDM	18
2.6 Efectos físicos en redes WSON	20
2.6.1 Clasificación de los efectos físicos.....	20
2.6.2 Impacto de los efectos físicos.....	21
2.6.3 Descripción de los efectos físicos	26
2.7 Parámetros para estimar la calidad de señal.....	31
2.7.1 Relación Señal a Ruido Óptica.....	32
2.7.2 Factor de Calidad o factor Q	33
3. Algoritmos RWA en tiempo real	35
3.1 Clasificación de demandas de tráfico.....	35
3.2 Descripción del problema DRWA clásico y limitaciones.....	36
3.3 Metodologías de encaminamiento clásicas	39
3.4 Clasificación de algoritmos clásicos de encaminamiento	40

3.5	Prestaciones de algoritmos clásicos de encaminamiento	42
3.5.1	Algoritmo SP.....	44
3.5.2	Algoritmo HW	45
3.5.3	Algoritmo DW	46
3.5.4	Algoritmo AW	47
3.5.5	Algoritmo HAW.....	48
3.5.6	Algoritmo TAW	48
3.5.7	Algoritmo HTAW	49
3.5.8	Algoritmo LCPR	49
3.5.9	Algoritmo LBRWA.....	49
3.5.10	Algoritmo HPLD.....	50
3.5.11	Algoritmo MFC.....	50
3.6	Clasificación de algoritmos clásicos de asignación de longitud de onda.....	51
3.7	Prestaciones de algoritmos clásicos de asignación de longitud de onda.....	54
3.7.1	Algoritmo R	56
3.7.2	Algoritmo FF.....	56
3.7.3	Algoritmo LU.....	57
3.7.4	Algoritmo MU.....	57
3.7.5	Algoritmo MP	58
3.7.6	Algoritmo LL	58
3.7.7	Algoritmo MS	59
3.7.8	Algoritmo $M\Sigma$	59
3.7.9	Algoritmo RLC	60
3.7.10	Algoritmo DRLC	61
3.7.11	Algoritmo Rsv	62
3.7.12	Algoritmo Thr	62
3.8	Algoritmos conjuntos de encaminamiento y asignación de longitud de onda	63
3.8.1	Algoritmo MSR.....	63
3.8.2	Algoritmo LLR.....	64
3.9	El problema PLI-DRWA.....	65
3.10	Algoritmos PLI-DRWA	67
3.10.1	Recomendaciones de la RFC-4054	67
3.10.2	Algoritmos CSP	68
3.10.3	Algoritmo B-OSNR	69
3.10.4	Algoritmo ICBR basado en factor Q.....	71

3.10.5	Algoritmo IABR basado en factor Q.....	72
3.10.6	Algoritmo DOIC	75
3.11	Asignación de longitud de onda considerando efectos físicos	78
4.	Propuesta algorítmica de IABR-FFWA	80
4.1	Motivación del algoritmo IABR-FFWA	80
4.2	Descripción del algoritmo IABR-FFWA	81
4.2.1	Descripción de la Etapa Base IABR-FFWA	82
4.2.2	Descripción de la Etapa Avanzada en Dos Tramos	82
4.3	Flujo del algoritmo IABR-FFWA	83
4.4	Función de coste diseñada.....	86
4.5	Establecimiento de prioridad entre nodos con capacidad de regeneración	90
4.6	Funcionamiento del algoritmo IABR-FFWA	91
5.	Simulación de algoritmos DRWA.....	96
5.1	Topologías de red.....	96
5.2	Modelo de enlace simulado.....	98
5.3	Simulación de peticiones incrementales	100
5.4	Cálculo de OSNR y PMD por el simulador	101
5.5	Descripción del simulador.....	102
5.6	Casos de estudio en tiempo real considerando bonanza de los “lightpaths”	105
5.6.1	Impacto del parámetro (“k”)	106
5.6.2	Impacto de la protección dedicada.....	109
5.6.3	Impacto de la función de coste en las prestaciones del algoritmo 3-SP.....	114
5.7	Casos de estudio en tiempo real considerando restricciones físicas.....	122
5.7.1	Impacto de las restricciones físicas de acuerdo a la distancia de transmisión... 122	
5.7.2	Ajuste de la función de coste del algoritmo IABR-FFWA	127
5.7.3	Comparativa en prestaciones de IABR-FFWA respecto a 1-CSP.....	132
6.	Conclusiones	136
6.1	Estrategias DRWA clásicas.....	136
6.2	Estrategias PLI-DRWA.....	137
6.3	Posibles líneas de Investigación futuras.....	140
	Apéndice	141
	Bibliografía	145
	Glosario de términos	156
	Presupuesto	164
	Pliego de condiciones.....	165

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Transmisión WDM	11
Ilustración 2: Evolución de redes ópticas [9]	12
Ilustración 3: Anillos virtuales sobre red óptica [18]	13
Ilustración 4: Extensiones del plano de control en modelo PCE [40]	17
Ilustración 5: Típica estructura de red IP sobre WDM [46]	18
Ilustración 6: Modelo de enlace simulado	22
Ilustración 7: Número máximo de vanos transmitidos en DQPSK a 10 Gbps	23
Ilustración 8: Número de vanos máximos DQPSK a 40 Gbps	23
Ilustración 9: Impacto del alcance DQPSK a 40 Gbps obtenido mediante simulación VPI-TID [50]	24
Ilustración 10: Umbrales de la dispersión cromática residual [54]	28
Ilustración 11: Impacto del filtrado por concatenación de ROADMs [18]	30
Ilustración 12: Relación Señal a Ruido Óptica en la transmisión óptica WDM [77]	33
Ilustración 13: Tipos de conjuntos de demandas de tráfico	35
Ilustración 14: Secuencia de establecimiento de un “ <i>lightpath</i> ” en tiempo real	37
Ilustración 15: “ <i>Lightpaths</i> ” sobre red óptica conmutada	37
Ilustración 16: Probabilidad de bloqueo encaminamiento fijo vs adaptativo [79]	43
Ilustración 17: Coste de HW	45
Ilustración 18: Ejemplo de función de coste HW [79]	46
Ilustración 19: Función de coste DW	47
Ilustración 20: Coste de AW	48
Ilustración 21: Probabilidad de bloqueo de técnicas WA [79]	55
Ilustración 22: Regeneración 3R [11]	66
Ilustración 23: Probabilidad de bloqueo de B-OSNR vs FF-LCP [65]	71
Ilustración 24: Diagrama de flujo del algoritmo IABR de C. T. Politi [105]	73
Ilustración 25: Prestaciones IABR [105]	74

Ilustración 26: Probabilidad de bloqueo DOIC vs MFC y vs CDT [54].....	78
Ilustración 27: Etapa base del algoritmo IABR-FFWA	83
Ilustración 28: Primer tramo de la etapa avanzada del algoritmo IABR-FFWA	84
Ilustración 29: Segundo tramo de la etapa avanzada del algoritmo IABR-FFWA	84
Ilustración 30: Pérdida de OSNR a 40Gbps.....	87
Ilustración 31: Función de coste de OSNR a 40Gbps	87
Ilustración 32: Coste de carga de enlace	88
Ilustración 33: Coste total de enlace dependiendo de los pesos de la función de coste	89
Ilustración 34: Topología de red ejemplo	92
Ilustración 35: Coste de los enlaces de red ejemplo.....	92
Ilustración 36: Coste de los caminos calculados mediante la etapa base IABR-FFWA	93
Ilustración 37: Selección del camino de menor coste	93
Ilustración 38: Selección del segundo camino de menor coste	94
Ilustración 39: Ejecución de la etapa avanzada en dos tramos.....	95
Ilustración 40: Establecimiento de un “ <i>lightpath</i> ” mediante la etapa avanzada IABR-FFWA...	95
Ilustración 41: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{2}$	97
Ilustración 42: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{4}$	97
Ilustración 43: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{6}$	97
Ilustración 44: Topología Pacific Bell con distancias escaladas por un factor 2	98
Ilustración 45: Modelo de enlace con ROADMs intermedios	99
Ilustración 46: Descripción del simulador	102
Ilustración 47: Aplicación del algoritmo IABR-FFWA mediante Weathermap en la red Pacific Bell escalada por un factor 2, a 40 Gbps – DQPSK.....	103
Ilustración 48: Petición de primer bloqueo sobre la topología NSFNET.....	107
Ilustración 49: Estado de red de primer bloqueo de petición NSFNET de acuerdo al factor (“k”).....	108
Ilustración 50: Petición de primer bloqueo en la topología Pacific Bell de acuerdo al factor (“k”).....	108
Ilustración 51: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP NSFNET sin protección.....	110

Ilustración 52: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP NSFNET con protección (1+1).....	112
Ilustración 53: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP Pacific Bell.....	113
Ilustración 54: Peticiones previas a primer bloqueo para distintas funciones de coste sobre NSFNET.....	115
Ilustración 55: Peticiones rechazadas 3-SP NSFNET para distintas funciones de coste	115
Ilustración 56: Circuitos por enlace en media en el estado final de red NSFNET tras 3-SP	116
Ilustración 57: Tiempo medio de procesamiento de peticiones NSFNET	117
Ilustración 58: Peticiones previas a primer bloqueo para distintas funciones de coste sobre Pacific Bell.....	118
Ilustración 59: Peticiones rechazadas 3-SP Pacific Bell para distintas funciones de coste.....	118
Ilustración 60: Carga de enlace en el estado final de la red Pacific Bell tras el algoritmo 3-SP	119
Ilustración 61: Prestaciones IABR-FFWA a 10 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{2}$	124
Ilustración 62: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{2}$	125
Ilustración 63: Prestaciones IABR-FFWA a 10 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{4}$	125
Ilustración 64: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{4}$	126
Ilustración 65: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{8}$	126
Ilustración 66: Comparativa de prestaciones en red Pacific Bell escalada por un factor 2 a 40 Gbps para distintas funciones de coste.....	131
Ilustración 67: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA a 40 Gbps sobre la topología Pacific Bell escalada por un factor 2 mediante la función de coste con pesos optimizados	132
Ilustración 68: Comparativa de prestaciones respecto a la petición de primer rechazo media IABR-FFWA vs 1-CSP.....	133
Ilustración 69: Comparativa de prestaciones respecto a la petición de primer rechazo IABR-FFWA vs 1-CSP.....	134
Ilustración 70: Comparativa de prestaciones respecto a la carga media de los enlaces IABR-FFWA vs 1-CSP.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Servicios que requieren gran ancho de banda	2
Tabla 2: Retos de ingeniería para el despliegue de una malla fotónica.....	3
Tabla 3: Tareas del proyecto final de carrera	7
Tabla 4: Retos tecnológicos en redes WSON	12
Tabla 5: Ventajas de las topologías de núcleo de red óptica malladas.....	13
Tabla 6: Redes ópticas troncales experimentales pioneras.....	14
Tabla 7: Redes comerciales pioneras de larga distancia	15
Tabla 8: Protocolos de un plano de control GMPLS.....	16
Tabla 9: Modelos de gestión de redes ópticas I [40]	16
Tabla 10: Modelos de gestión de redes ópticas II [40].....	17
Tabla 11: Propuestas de evolución de la convivencia de las capas óptica e IP.....	19
Tabla 12: Mecanismos de encaminamiento en redes WRON (IP sobre WDM).....	19
Tabla 13: Efectos físicos lineales	20
Tabla 14: Efectos físicos no lineales	20
Tabla 15: Impacto de los efectos físicos	21
Tabla 16: Características de transmisión que condicionan el impacto de los efectos físicos.....	25
Tabla 17: Limitaciones debidas a los efectos físicos	25
Tabla 18: Tareas DRWA.....	38
Tabla 19: Consideraciones del problema DRWA clásico	38
Tabla 20: Clasificación de estrategias de encaminamiento clásicas	39
Tabla 21: Descripción de estrategias de encaminamiento.....	40
Tabla 22: Algoritmos de encaminamiento clásicos válidos para el tiempo real	42
Tabla 23: Técnicas clásicas de asignación de longitud de onda para redes monofibra.....	53
Tabla 24: Prestaciones de las técnicas de asignación de longitud de onda	54

Tabla 25: Selección de técnicas conjuntas DRWA	63
Tabla 26: Clasificación de estrategias PLI-DRWA	65
Tabla 27: Criterios considerados en algoritmos PLI-DRWA.....	67
Tabla 28: Técnicas de asignación de longitud de onda considerando efectos físicos	79
Tabla 29: Fragmento del estado del enlace node5-node14	105
Tabla 30: Criterios del análisis estadístico de simulación.....	106
Tabla 31: Petición de primer bloqueo en topología NSFNET sin restricciones físicas	107
Tabla 32: Retraso de la petición de primer bloqueo en topología Pacific Bell de acuerdo al factor ("k")	109
Tabla 33: Análisis estadístico del número de circuitos en el enlace más cargado para 3-SP NSFNET con función de coste distancia.....	111
Tabla 34: Análisis estadístico de los circuitos en el enlace más cargado Pacific Bell con función de coste distancia	114
Tabla 35: Análisis estadísticos NSFNET para distintas funciones de coste	116
Tabla 36: Análisis estadístico del tiempo de simulación para topología NSFNET y funciones de coste propuestas	117
Tabla 37: Análisis estadísticos Pacific Bell para distintas funciones de coste.....	119
Tabla 38: Análisis estadístico del tiempo de simulación Pacific Bell.....	120
Tabla 39: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre topología NSFNET $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$ a 10 Gbps	123
Tabla 40: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre topología NSFNET $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$ a 40 Gbps	123
Tabla 41: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste I.....	128
Tabla 42: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste II.....	128
Tabla 43: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor con distintas funciones de coste III	129
Tabla 44: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste IV	130
Tabla 45: Comparativa de prestaciones Pacific Bell escalada por un factor 2 a 40 Gbps.....	131
Tabla 46: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP I	132

Tabla 47: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP II.....	133
Tabla 48: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP III.....	133

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del Proyecto

La motivación de este proyecto surge de la necesidad de despliegue de redes fotónicas, (“*Photonic Network*”, PN), por las principales operadoras, para dar respuesta al rápido crecimiento de Internet, como indica la previsión de Cisco [1].

Las PN resuelven el reto del establecimiento de servicios de banda ancha en tiempo real, como servicios empresariales, servicios para telecirugía (vídeo de alta definición), vídeo o imágenes de alta resolución, videoconferencia, etc., permitiendo a las empresas portadoras (“*Optical carrier*”, OC) explotar en profundidad los beneficios del transporte sobre una red óptica inteligente, como atestigua el artículo de Nortel [2]. El ámbito de este tipo de servicios así como el ancho de banda requerido puede observarse en la Tabla 1.

La gran ventaja de las redes fotónicas extremo a extremo, (“*End-to-End*”, E2E), es su capacidad para soportar cualquier tipo de servicio con independencia de sus requisitos de ancho de banda y calidad de servicio. Este tipo de redes permiten la transmisión simultánea de servicios con tasas de bits muy grandes como las ya reseñadas o bien pequeñas (voz), incluso la penetración de nuevos servicios de Internet. Una introducción a este respecto se encuentra en [3].

Servicios		Ancho de banda
Servicios empresariales	VPN óptica	1-100 Gbps
	Replicación de bases de datos	1 Gbps
Tele-cirugía	Video de alta definición sin codificar	1 Gbps
Contenidos en tiempo real para salas de cine	Ultra HDTV (UHDTV)	400 Mbps
Servicios Residenciales	TV/Videoconferencia 2D Alta Definición	10-15 Mbps por canal
	Juegos en Red	1 Mbps
	TV/Videoconferencia 3D (definición estándar)	50 Mbps por canal

Tabla 1: Servicios que requieren gran ancho de banda

Otra ventaja de la malla fotónica es que proporciona la oportunidad de “caracterizar” el contenido de la información transmitida. Esto permite gestionar mejor su uso, evitar saturaciones y fraudes, e identificar nuevas oportunidades de negocio.

Por otro lado, las Redes Todo Ópticas permiten reducir los costes tanto de inversión, (“*Capital Expenditure*”, CapEx), como de operación, (“*Operation Expenditure*”, OpEx), de la red troncal, como indican los informes de Telefónica [4]:

- La conmutación óptica reduce los costes de la conversión opto-electrónica y provee de una gran flexibilidad de red.
- La introducción de las técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (“*Wavelength Division Multiplexing*”, WDM) y posteriormente de multiplexación por división de longitud de onda densa (“*Dense Wavelength Division Multiplexing*”, DWDM) permite la coexistencia y transmisión simultánea de canales ópticos sobre una misma fibra.
- La mejora tecnología de los equipos ópticos en los últimos años.

Otra ventaja de la malla fotónica es que su finalidad no se limita a la transmisión del cauce de datos, sino que se prevé su interacción con los equipos (“*Internet Protocol*”, IP) ya desplegados, aportando mayor flexibilidad. Estudios de Telefónica así lo exponen [5].

Las PNs o mallas fotónicas previstas son redes con encaminamiento por longitud de onda (“*Wavelength Routed Optical Network*”, WRON). En concreto, se analiza en este proyecto el establecimiento de “*lightpaths*” en redes de conmutación óptica de circuitos (“*Wavelength Switched Optical Network*”, WSON).

Este tipo de redes están provistas de gran flexibilidad, que proviene de la transparencia del formato de señal óptica y de la propia conmutación óptica, pero además se prevé la posibilidad de establecer caminos lógicos reconfigurables.

En la Tabla 2 se enumeran los principales retos de ingeniería a los cuales debe hacer frente la empresa OC para el adecuado funcionamiento y despliegue de una malla fotónica.

Retos de ingeniería para el despliegue de una red WSON
El adecuado dimensionado de la red troncal fotónica de acuerdo a las tareas de encaminamiento y asignación de longitud de onda estáticamente, (“Routing and Wavelength Assignment”, RWA).
El establecimiento de circuitos ópticos o “lightpaths” en tiempo real, que involucra las tareas de encaminamiento y asignación de longitud de onda en tiempo real (“Dynamic Routing and Wavelength Assignment”, DRWA).
La necesidad de un plano de control inteligente.
La interacción de los planos ópticos e IP.
La adecuada ubicación de conversores de longitud de onda (“ λ ”).
Los mecanismos de reserva de “lightpaths” sobre la red fotónica.

Tabla 2: Retos de ingeniería para el despliegue de una malla fotónica

Descripción del problema DRWA

De los retos de ingeniería presentados, este proyecto tiene como objetivo proporcionar una solución algorítmica y heurística al establecimiento de circuitos ópticos lógicos configurables, conocidos como “lightpaths”, en tiempo real, entre pares de nodos origen-destino.

Este problema que involucra el encaminamiento y asignación de longitud de onda dinámicamente, por lo que se conoce como (“Dynamic Routing and Wavelength Assignment”, DRWA), responde a la necesidad de dotar a la malla fotónica de mecanismos que en tiempo real, permitan cursar el tráfico agregado que llegue a la malla, estableciendo “lightpaths” entre pares de nodos origen-destino. Estos mecanismos estarán controlados por algún elemento de gestión.

El problema DRWA requiere de tareas diferenciadas que son objeto de estudio de este proyecto:

- Un adecuado cómputo del camino o encaminamiento a través de la red.
- La asignación de una longitud de onda (“ λ_i ”) disponible.

El problema DRWA está sujeto a una restricción de continuidad de la longitud de onda (λ). Esta restricción consiste en la conservación del canal óptico, caracterizado por una longitud de onda, (λ_i), a lo largo de toda la transmisión a través de la malla. Puede considerarse como la continuidad del *“lightpath”*.

La restricción de continuidad de longitud de onda, (λ), supone una dificultad adicional al problema RWA, ya que no será posible establecer un *“lightpath”* a través de una ruta preferente, si no existe una longitud de onda, (λ_i), disponible a lo largo de dicha ruta. Este caso puede darse a partir de cierto nivel de carga de la red.

Esta limitación puede salvarse en presencia de convertidores ópticos de longitud de onda, (λ). En presencia de convertidores el *“lightpath”* podría afrontar el siguiente tramo de camino con una longitud de onda, (λ_j), distinta a la asignada para el tramo anterior, (λ_i).

El problema DRWA ha de abordarse de forma diferente a un problema de planificación de red. La planificación de red proporciona una respuesta a las tareas de encaminamiento y asignación de onda estáticamente (*“Routing and Wavelength Assignment”*, RWA) y tiene como objetivo dimensionar adecuadamente la red así como optimizar sus prestaciones mediante algoritmos *“off-line”*. A este respecto, se recomienda la referencia [6].

El problema DRWA comparte el objetivo de optimización de prestaciones de red, pero es un problema *“on-line”*. Por esta razón, está sujeto a una serie de restricciones adicionales que aumentan su complejidad:

- La demanda total no es conocida.
- El tiempo de cómputo permitido es limitado.

En tiempo real la demanda de tráfico que debe acomodar la malla fotónica se considera no conocida. Por lo tanto, para las tareas del encaminamiento y de la asignación de longitud de onda, (λ), seleccionados se dispone únicamente de la información del estado actual de la red; es decir, de los recursos de red disponibles en el instante en que se recibe el flujo de datos o petición. Esta es una limitación fundamental que diferencia las restricciones características del tiempo real respecto a un problema de planificación estática de red.

La segunda limitación es una limitación en tiempo de computación o retardo, que no aplica de forma tan trascendente a la planificación de red. Es fundamental que el algoritmo en tiempo real asigne *“lightpaths”* para cada nueva petición en un corto periodo de tiempo (del orden de los milisegundos), para dar respuesta a aplicaciones de elevado ancho de banda, mientras que en planificación el retardo puede ser de horas o incluso días.

El objetivo del tiempo real es acomodar las peticiones de tráfico “*on-line*” de forma eficaz y eficiente, con la información del estado de la red disponible y en un tiempo de procesado del orden de milisegundos. Un adecuado algoritmo DRWA alcanzará una solución subóptima respecto a la planificación debido a las restricciones adicionales.

La necesidad de realizar un reparto de la carga de la red, o equilibrado de carga, es una consideración importante en la algoritmia DRWA. Es conveniente que el algoritmo DRWA realice cierto reparto del tráfico a través de la red, descongestionando los nodos más cargados. De esta manera se puede alargar el tiempo de vida de la misma, como justificaremos en capítulos posteriores.

Por último, en los últimos años se ha impuesto un nuevo criterio en el problema RWA; el de la viabilidad de los “*lightpaths*”. Los “*lightpaths*” establecidos deben ser viables físicamente. La inclusión de esta nueva restricción nos lleva al problema DRWA considerando los efectos nocivos de la capa física, que se conoce como (“*Physical Layer Impairment - Dynamic Routing and Wavelength Assignment*”, PLI-DRWA).

Consideraciones del problema PLI-DRWA

Sobre la señal óptica transmitida actúan una serie de fenómenos físicos que tienen como consecuencia un decaimiento de la calidad de la señal, disminuyendo la relación señal a ruido óptica (“*Optical Signal to Noise Ratio*”, OSNR) y/o el factor de calidad, (“*Q factor*”).

Debido a la disminución de calidad de señal pueden producirse errores en la recepción de la información. Estos errores se contabilizan mediante la tasa de error de bit, (“*Bit error Rate*”, BER), que es la relación entre el número de bits erróneos y el número de bits transmitidos.

La BER aumenta con la pérdida de OSNR o pérdida de factor Q. En el capítulo 2 se expone en mayor detalle la estrecha relación entre ambos parámetros.

La consecuencia inmediata del impacto de los fenómenos físicos recae sobre el alcance máximo en transmisión o dicho de otra manera, la distancia máxima que permite proporcionar “*lightpaths*” viables. También puede interpretarse como el número de vanos máximo de los “*lightpaths*”.

Una manera de mejorar el alcance es la regeneración de señal (“*Regeneration, Retiming and Reshaping*”, 3R), que permite recibir la señal transmitida en algún punto del “*lightpath*”, generarla de nuevo, sincronizarla y volverla a transmitir con mayor calidad.

Mediante la inclusión de los efectos de la capa física en la algoritmia DRWA, así como la inclusión del uso de regeneradores de señal, es posible el establecimiento de “*lightpaths*” con garantías de calidad de la señal. La incorporación de estos fenómenos

supone la inclusión de un mayor número de restricciones y variables en el problema, aumentando su complejidad.

En la literatura más reciente coexisten dos tendencias para introducir los efectos de la capa física en el problema DRWA:

- En la primera de ellas se tratan los efectos físicos como restricciones en el alcance sin regeneración, problema conocido como (*“Physical Layer Impairment Constraint Dynamic Routing and Wavelength Assignment”*, PLIC-DRWA),
- En la segunda tendencia se consideran de los efectos físicos no solo como restricción sino como criterio de la función de coste de los enlaces, lo que se conoce como (*“Physical Layer Impairment Aware Dynamic Routing and Wavelength Assignment”*, PLIA-DRWA).

1.2 Objetivos del Proyecto

El objetivo inicial del proyecto es realizar un análisis cualitativo de la algoritmia DRWA heurística presente en la literatura, que permita establecer las necesidades y los criterios para el diseño de un algoritmo PLI-DRWA.

Solamente las investigaciones más recientes consideran los efectos físicos no deseables en la algoritmia DRWA. La mayor parte de las propuestas presentadas pertenecen al ámbito investigador y académico por lo que no constituyen una solución eficaz en entornos reales (no emulados).

Para la realización de este estudio se ha tomado como punto de partida las consideraciones y criterios provenientes de algoritmos clásicos DRWA y enfoques académicos PLI-DRWA y PLI-RWA descritos en la literatura. También se consideran reportes *“White Paper”* de los principales OC, como Telefónica, Tellabs, Huawei, etc.

El objetivo final de este proyecto es proporcionar una solución realista, eficaz y de retardo limitado al problema PLI-DRWA mediante algoritmia heurística.

La estrategia algorítmica presentada es de tipo PLIA-DRWA; es decir, no solo se comprueba que los *“lightpaths”* cumplen una serie de restricciones de calidad de señal, sino que se consideran los efectos físicos de forma explícita en la función de coste del algoritmo. Para proporcionar un mayor alcance de transmisión la estrategia propuesta dispone de la capacidad de utilización de regeneradores de señal (3R) presentes en nodos específicos.

1.3 Tareas del Proyecto

En la Tabla 3 se presentan las tareas requeridas para el diseño y evaluación de un algoritmo heurístico RWA en tiempo real, considerando las restricciones físicas:

Tareas del proyecto
Estudio del problema DRWA, sus objetivos y restricciones.
Recopilación y estudio de las técnicas algorítmicas DRWA clásicas propuestas en la literatura, que consideran la transmisión a través de un medio ideal.
Selección de las técnicas DRWA clásicas más representativas.
Análisis de los efectos físicos nocivos que afectan la calidad de la señal transmitida.
Recopilación y estudio de las técnicas algorítmicas DRWA recientes propuestas en la literatura, que consideran los efectos físicos en la algoritmia DRWA.
Evaluación cualitativa de las técnicas DRWA a partir de la información obtenida.
Propuesta algorítmica DRWA eficaz y viable para su implementación, que considere los efectos físicos en su algoritmia, así como equilibrado de carga y regeneración de señal.
Diseño de una estrategia para ordenar por preferencia los regeneradores disponibles para cada par origen-destino.
Definición de escenarios con topología de red mallada, como la topología de la NSFNET de 1991, y la topología de la red Pacific Bell.
Realización de un simulador en Matlab e implementación del algoritmo propuesto.
Simulación bajo demandas en las que se distribuyen uniformemente los pares origen-destino.
Evaluación cuantitativa del algoritmo propuesto bajo varios criterios: <ul style="list-style-type: none"> ○ La carga de los enlaces en el estado final de red. ○ La probabilidad de bloqueo. ○ El número de peticiones establecidas previas al primer rechazo de petición. ○ El número de caminos calculados en dos tramos mediante regeneración. ○ El tiempo de cómputo requerido.

Tabla 3: Tareas del proyecto final de carrera

1.4 Estructura de la memoria

La memoria consta de un capítulo 2 de introducción a las redes fotónicas conmutadas, (“*Wavelength Switched Optical Network*”, WSON). En él se expone su

buena disposición y ventajas tecno-económicas para dar soporte a servicios actuales y futuros en tiempo real.

Por otro lado, se hace referencia a la necesidad de diseño de un plano de control inteligente, introduciendo la arquitectura IP sobre WDM.

Posteriormente se clasifican y describen los efectos físicos nocivos demostrando su impacto en la calidad de señal transmitida, en concreto sobre sistemas de larga distancia (“*long haul*”, LH) y (“*ultra-long haul*”, ULH).

Finalmente se describen los principales parámetros para determinar la calidad de señal.

El capítulo 3 trata de algoritmos RWA en tiempo real. Para ello se clasifican los tipos de demanda RWA; tanto “*off-line*” como “*on-line*”. A continuación se describe el problema DRWA clásico, exponiendo sus limitaciones ante entornos reales (no emulados).

Se describe una colección de algoritmos DRWA heurísticos, tanto para la tarea de encaminamiento, como para la tarea de asignación de longitud de onda, (“ λ ”). También se presentan algunas soluciones conjuntas al problema DRWA clásico.

Se describe el problema PLI-DRWA, así como las restricciones adicionales que incorpora, explicando la necesidad de regeneración, exponiendo un conjunto de algoritmos PLI-DRWA y PLI-RWA presentes en la literatura, de ámbito investigador y/o académico.

En el capítulo 4 se describe la propuesta algorítmica IABR-FFWA. Para ello se expone de qué manera se han aplicado las consideraciones anteriores para el diseño de un algoritmo heurístico PLI-DRWA viable para una implementación real. Estas consideraciones incluyen las necesidades de:

- Establecer caminos viables en cuanto a la calidad de señal.
- Equilibrar la carga de red evitando la congestión de nodos.
- Regenerar la señal para obtener mayores prestaciones de red.
- Limitar la complejidad del algoritmo para disminuir el retardo en tiempo real.

A continuación se detalla el algoritmo IABR-FFWA diseñado, describiendo tanto sus etapas básica y avanzada, como la función de coste diseñada. También se expone la estrategia diseñada para el establecimiento de prioridad entre los regeneradores.

En el capítulo 5 se proponen una serie de casos de simulación de algoritmos DRWA. Para ello se presenta el entorno de simulación: los escenarios de referencia,

el modelo de enlace, el impacto de OSNR y PMD sobre dicho modelo y el tipo de tráfico simulado.

El tipo de tráfico de llegada simulado es un conjunto de peticiones incrementales, lo que significa que los “*lightpaths*” establecidos permanecen ocupando recursos de red durante toda la simulación. Por esta razón no se simula el instante en que se producen los flujos agregados, sino que el conjunto de flujos que constituye la demanda, se ordena aleatoriamente. El instante en que tiene lugar un nuevo flujo no es relevante, pero sí lo es el orden en el que se produce, que determinará el estado de carga de la red y por lo tanto, los recursos disponibles en ella, en ausencia de caídas de enlaces o averías.

Se describe el simulador realizado mediante Matlab, así como las principales funciones que lo componen.

Posteriormente se expone un estudio algorítmico de prestaciones mediante simulación. Este estudio se compone de una serie de casos de estudio, diferenciando entre los que consideran bonanza de los “*lightpaths*” y aquellos en los que se incluye el impacto de los efectos físicos.

Para los primeros se evalúa el algoritmo de menor coste “*Shortest-Path*” con distintas configuraciones, mientras que para los segundos se simula el algoritmo propuesto IABR-FFWA también con distintas configuraciones.

Finalmente se establece una comparativa en prestaciones entre ambos algoritmos bajo entornos reales. Dicha comparativa permite observar la mejora en prestaciones obtenida mediante la propuesta diseñada, salvando el impacto de los efectos físicos.

En el capítulo 6 se muestran las conclusiones extraídas a partir de la información recopilada y su estudio. Se exponen posibles líneas futuras de investigación, que podrían desarrollarse de forma complementaria al proyecto realizado.

CAPÍTULO II

2. INTRODUCCIÓN A LAS REDES FOTÓNICAS CONMUTADAS, WSON

2.1 Hitos tecnológicos

Para la evolución y cambio de enfoque que han experimentado las redes de transporte óptico con encaminamiento por longitud de onda (“*Wavelength Routed Optical Network*”, WRON) han resultado fundamentales los siguientes hitos tecnológicos:

- La posibilidad de multiplexación de canales (“*Wavelength Division Multiplexing*”, WDM) y posteriormente multiplexación de canales densa (“*Dense Wavelength Division Multiplexing*”, DWDM).
- La evolución de los equipos ópticos haciendo posible la conmutación óptica y por lo tanto, la eliminación de la conversión a los dominios óptico-eléctrico-óptico (“*Optical-Electronic-Optical*”, OEO).

La multiplexación DWDM permite la transmisión de varias señales ópticas portadoras a través de una misma fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda. Para la transmisión DWDM se necesita un multiplexor que combine las señales en el lado del transmisor y un demultiplexor en el lado del receptor que las separe. Para más información sobre WDM consúltese la referencia [7].

En la Ilustración 1 se observa un enlace de este tipo.

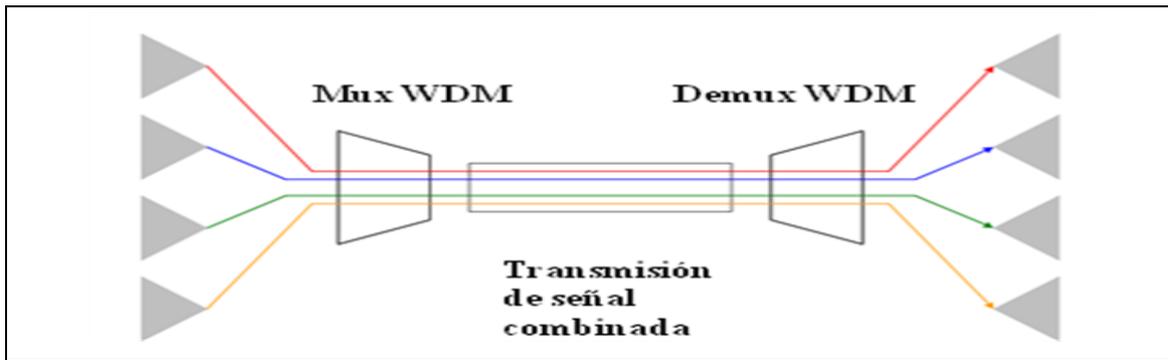


Ilustración 1: Transmisión WDM

Mediante la conmutación óptica es posible eliminar la conversión OEO característica de la conmutación en el dominio eléctrico. De esta manera se elimina:

- El coste de conversión debido a regeneradores OEO.
- La dependencia de los procesos de conversión respecto a la tasa de bits y formatos de modulación.

En el apartado 2.2 se explica la evolución de redes WRON hacia redes de conmutación óptica de circuitos (“*Wavelength Switched Optical Network*”, WSON).

2.2 Evolución hacia la transparencia de red

Las redes WRON evolucionan hacia la conmutación óptica de circuitos, característico de redes WSON y hacia la transparencia de red.

El grado de transparencia hace referencia a la transmisión y a la conmutación que pueden realizarse en el dominio eléctrico u óptico. Se identifica como transparente al dominio óptico y como opaco al dominio eléctrico.

Las redes opacas, representadas en la Ilustración 2 zona izquierda, se caracterizan porque la conmutación en todos los nodos se realizaba en el dominio eléctrico [8].

- En las redes translúcidas, representadas en la Ilustración 2 zona central, se realiza conmutación óptica en los nodos. La señal permanece en el dominio óptico hasta que abandona la red. La agregación y desagregación requieren conversión OEO. Para más información consúltese [9].
- En las redes transparentes, representadas en la Ilustración 2 zona derecha, no sólo se realiza conmutación óptica, sino que la agregación y desagregación de tráfico también se realiza en el dominio óptico. Multitud de referencias tratan la transmisión todo-óptica, así como sus retos tecnológicos. Información adicional sobre redes transparentes se encuentra en las referencias [9][11][12] y [13].

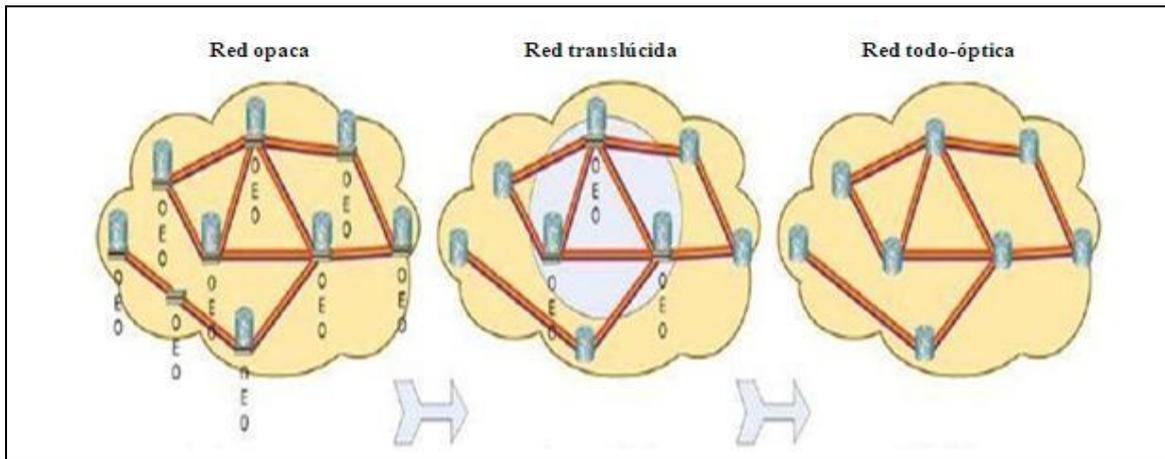


Ilustración 2: Evolución de redes ópticas [9]

Los citados retos tecnológicos a los que se enfrentan las redes WSON se enumeran en la Tabla 4:

Retos tecnológicos a los que se enfrentan las redes WSON
El establecimiento de circuitos ópticos o “lightpaths” conmutados requiere de una algoritmia PLI-DRWA adecuada, que mantenga la probabilidad de bloqueo baja.
La mitigación de efectos físicos dispersivos.
El empleo de formatos de modulación avanzados para la transmisión efectiva que combata los límites que estos efectos físicos imponen.
Los equipos que permitan la regeneración de señal y conversión de longitud de onda, (“ λ ”), en tiempo real sin corte de tráfico, (3R), aún no están disponibles comercialmente. Más información se encuentra en [14].

Tabla 4: Retos tecnológicos en redes WSON

Ante la restricción de continuidad de longitud de onda, (“ λ ”), no es difícil la provisión de caminos de protección dedicados, (“*Dedicated Backup Path Protection*”, DBPP). Para mayor detalle consúltese la referencia [15].

Sin embargo, la protección compartida (“*Shared Backup Path Protection*”, SBPP) se simplificaría mediante la posibilidad de realizar conversión de longitud de onda, (“ λ ”), en caso de fallo de red.

La protección dedicada o DBPP requiere de un consumo de recursos de red significativamente mayor en redes transparentes que en las redes opacas. Para mayor detalle consúltese las referencias [16] y [17].

2.3 Topologías de red

La topología adecuada para una red troncal WSON depende de las necesidades del OC. Sin embargo, las topologías malladas presentan una serie de ventajas frente a los tradicionales anillos de jerarquía digital síncrona (“*Synchronous Digital Hierarchy*”, SDH). Dichas ventajas se representan en la Tabla 5:

Ventajas que presentan topologías de núcleo de red malladas
Las mallas proporcionan mayor conectividad.
Permiten reconfiguración de red.
Proporcionan conexiones punto a punto (“Peer to Peer”, P2P) más cortas y rápidas entre pares de nodos, que las que proveería un recorrido en anillo.
El mallado presenta ventajas para la protección y restauración de red, evitando los fallos catastróficos o caída parcial o total de la red.

Tabla 5: Ventajas de las topologías de núcleo de red óptica malladas

Una opción viable para el núcleo de red es la creación de topologías de red malladas, basadas en la conexión de multiplexores ópticos reconfigurables de agregación y desagregación de tráfico (“*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*”, ROADM).

Mediante un mallado entre ROADMs es posible el despliegue de una infraestructura óptica universal que soporte simultáneamente múltiples topologías de red. Se trata de la provisión de redes privadas virtuales (“*Virtual Private Network*”, VPN) que se superponen sobre la infraestructura óptica.

En la Ilustración 3, línea discontinua por un lado y línea continua por otro, se representan sendos anillos virtuales que constituye VPNs sobre una topología mallada.

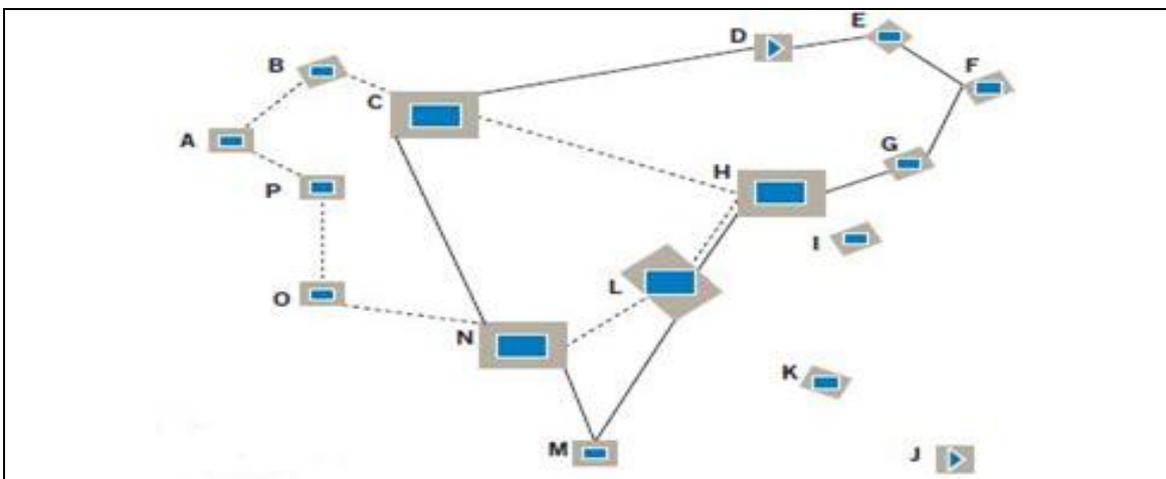


Ilustración 3: Anillos virtuales sobre red óptica [18]

2.4 Despliegues pioneros

Algunos de los primeros despliegues de campo experimentales de (“*Optical Transport Networks*”, OTNs), de larga distancia LH y ULH se exponen en la Tabla 6:

Redes ópticas troncales experimentales
Red (“ <i>Optical Network Technology Consortium</i> ”, ONTC). Mayor información se encuentra en la referencia [19].
Red (“ <i>Multiwavelength Optical Networking</i> ”, MONET). Se detalla en las referencias [20] y [21].
Red (“ <i>The European Multiwavelength Transport Network</i> ”, MTWN). Puede consultarse en las referencias [22] y [23].

Tabla 6: Redes ópticas troncales experimentales pioneras

Las redes de larga distancia LH y ULH inicialmente se utilizaron sólo como enlaces P2P. En las referencias [24][25] y [26] se encuentra información acerca de experimentos pioneros y retos tecnológicos con el objetivo de aumentar el alcance de los enlaces.

Las redes troncales han ido adquiriendo inteligencia y mayores funcionalidades mediante la utilización de conmutadores ópticos (“*Optical Cross Connects*”, OXCs). Experimentos de redes ópticas conmutadas WRON de larga distancia LH y ULH se reportan en [27][28][29] y [30]. Algunas de las redes ópticas comerciales LH, pioneras en su despliegue se describen en la Tabla 7:

Redes comerciales LH pioneras	Descripción	Plano de control
Red (“ <i>Dynegy Global Communications</i> ”)	Red mallada nacional de diseño opaco que utiliza OXCs de telio. Consúltese [31].	Funcionalidades de control y gestión de red de forma propietaria. Utilizaron la inteligencia de los OXCs para realizar las tareas de aprovisionamiento de circuitos, conmutación del tráfico y recuperación ante fallos.
Red (“ <i>AT&T</i> ”)	Red mallada nacional de diseño opaco con otro tipo de OXCs del fabricante Ciena. Consúltese referencias [32] y [33].	Funcionalidades de control y gestión de red de forma propietaria. Utilizaron la inteligencia de los OXCs para realizar las tareas de aprovisionamiento de circuitos, conmutación del tráfico y recuperación ante fallos.
Red (“ <i>Broadwing Communications Services</i> ”)	Red opaca con OXCs transparentes del fabricante Corvis.	Funcionalidades de control y gestión de red de forma propietaria. Sin inteligencia de red.

Red española de Telefónica	Red translúcida con OXCs y amplificadores tipo EDFA. Consúltese referencia [3].	La red de Telefónica utiliza un plano de control mediante GMPLS. Es una red fotónica dotada de inteligencia.
----------------------------	---	--

Tabla 7: Redes comerciales pioneras de larga distancia

2.5 Plano de Control

Para gestionar posibles fallos, replanificaciones periódicas, y en general todos los requerimientos de operación, administración y mantenimiento de la red óptica es necesario un plano de control (“*Control Plane*”, CP).

Por ejemplo, se requiere de un CP para el aprovisionamiento de recursos de red de forma rápida y flexible y para proporcionar a la red alta fiabilidad y escalabilidad.

Dos organismos han participado de forma separada en la estandarización del plano de control, habiéndose concretado en:

- La propuesta (“*Automatically Switched Optical Network*”, ASON) del organismo ITU. Para mayor información consúltese [34].
- La propuesta (“*Generalized Multi Protocol Label Switching*”, GMPLS), también conocida como MPLambdaS, de la IETF. Para mayor información consúltese [35].

Mientras que en la propuesta ASON se define la arquitectura del plano de control, sus requisitos y funcionalidades, independientemente del protocolo utilizado, mediante la propuesta GMPLS se define una serie de protocolos específicos para el plano de control. Para más información consúltese [36] y [37].

Los protocolos del plano de control GMPLS se enuncian en la Tabla 8.

Protocolos de plano de control GMPLS	Aplicación
<p>El protocolo (“<i>Resource Reservation Protocol- Traffic Extension</i>”, RSVP-TE) que incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ “<i>Neighbor Discovery Protocol</i>”, NDP [39]. ○ “<i>Link State Advertisements</i>”, LSA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza para crear y anunciar las topologías de red entre los nodos y funciones de señalización. - Los protocolos NDP y LSA realizan funciones de descubrimiento de vecinos y señalización mediante intercambio de anuncios entre enlaces, respectivamente.

El protocolo de gestión de enlaces “ <i>Link Management Protocol</i> ”, LMP	- Realiza la gestión de recursos: el control de conectividad de canales, verificar la conectividad de enlaces y aislar fallos de enlaces.
El protocolo “ <i>Open Shortest Path First- Traffic Extension</i> ”, OSPF-TE	- Se utiliza para el encaminamiento.

Tabla 8: Protocolos de un plano de control GMPLS

El trabajo más reciente sobre GMPLS incluye funcionalidades del CP que permiten reducir el impacto de las restricciones físicas (“*Physical Layer Impairments*”, PLI). Para mayor detalle consúltese [40].

Se han propuestos tres modelos de gestión de red óptica, que pueden consultarse en las referencias [41] y [42]:

- El modelo del Elemento de Computación de Caminos (“*Path Computation Element*”, PCE).
- El modelo de Señalización.
- El modelo de Encaminamiento.

En las Tablas 9 y 10 se exponen las características de estos modelos.

Modelo	Enfoque	Requisitos
PCE	Centralizado	- PCE con alta fiabilidad. - Base de datos de tráfico global (“ <i>Traffic Engineering Database</i> ”, TED) - Bases de datos de efectos físicos global (“ <i>Physical Layer Impairment Database</i> ”, PLID).
Encaminamiento	Distribuido	- Base de datos PLID global. - Algunas extensiones para diseminar eficientemente el funcionamiento PLI.
Señalización	Distribuido	- Base de datos local PLID. - Modelos matemáticos para estimación PLI. - Algunas extensiones.

Tabla 9: Modelos de gestión de redes ópticas I [40]

Modelo	Ventajas	Inconvenientes
PCE	<ul style="list-style-type: none"> - Visión global de la red. - Optimización del cómputo del camino. - Sin cambios en los protocolos de control. - Útil para escenarios multidominio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja flexibilidad y escalabilidad. - Vulnerabilidad frente a fallos en base de datos. - Recuperación lenta. - Necesidad para la monitorización de prestaciones ópticas (“<i>Optical Performance Monitoring</i>”, OPM) de cómputo intensivo.
Encaminamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Enfoque distribuido. - Optimización del cómputo del camino. - Tiempo de “<i>setup</i>” corto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Convergencia lenta. - Cálculos intensivos. - Necesidad de cómputo intensivo en OPM.
Señalización	<ul style="list-style-type: none"> - Enfoque distribuido. - Requiere cambios menores en el protocolo de señalización. - No hay sobrecarga por diseminación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de “<i>setup</i>” elevado. - Sobrecarga por señalización. - No se consigue un óptimo aprovechamiento de recursos. - No se consigue una óptima calidad de señal.

Tabla 10: Modelos de gestión de redes ópticas II [40]

El modelo PCE se representa en la Ilustración 4. Un algoritmo PLI-DRWA se gestiona sobre un PCE central. Además éste dispone de una base de datos TED central donde almacena medidas de efectos físicos y otra base de datos PLID donde se recibe la información del sistema de gestión NMS, por ejemplo umbrales para el algoritmo.

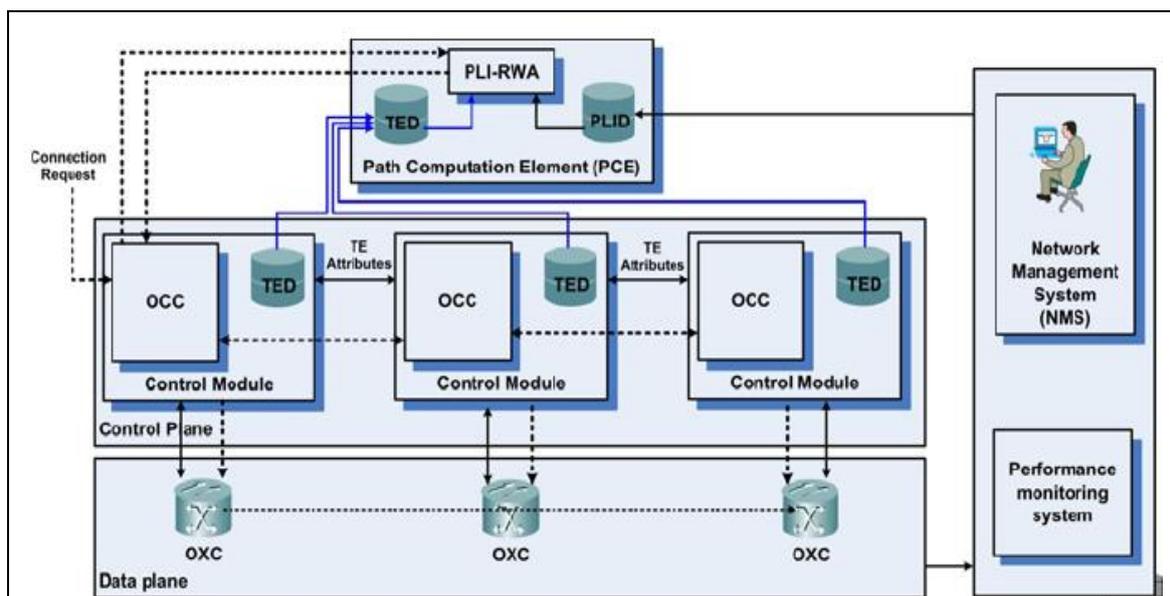


Ilustración 4: Extensiones del plano de control en modelo PCE [40]

Cada nodo de conmutación OXC tiene un controlador de módulo en el cual residen una base de datos TED local para almacenar medidas de efectos físicos y un controlador de conexión óptico (“*Optical Connection Controller*”, OCC), que solicita conexión al algoritmo PLI-RWA y recibe como respuesta el “*lightpath*” asignado.

El modelo PCE provee de caminos subóptimos en términos de utilización de red y calidad de señal. Pero presenta una serie de ventajas respecto a los modelos de Encaminamiento y Señalización:

- No requiere de ninguna modificación o extensión de los protocolos de encaminamiento y señalización actuales.
- El PCE es centralizado y tiene una visión global de la red, lo que facilita la provisión de servicios.
- No requiere de reintentos en el establecimiento de “*lightpaths*”.
- Permite una adecuada monitorización de los efectos físicos.
- El modelo PCE parece adecuado para escenarios multidominio.

2.5.1 Introducción a la arquitectura IP sobre WDM

La transmisión de paquetes de datos IP directamente sobre la red óptica WDM, conocida como tecnología IP sobre WDM, permite el despliegue de redes de telecomunicación de nueva generación, que tienden a emerger en la red troncal, “*backbone*”, pero también en redes metropolitanas o de acceso.

Este tipo de redes permite sostener el crecimiento de tráfico previsto, proporcionando gran capacidad de transmisión a los niveles de transporte superiores. Además facilita la interconectividad con la infraestructura IP ya desplegada.

En la Ilustración 5 se representa una típica estructura IP sobre WDM:

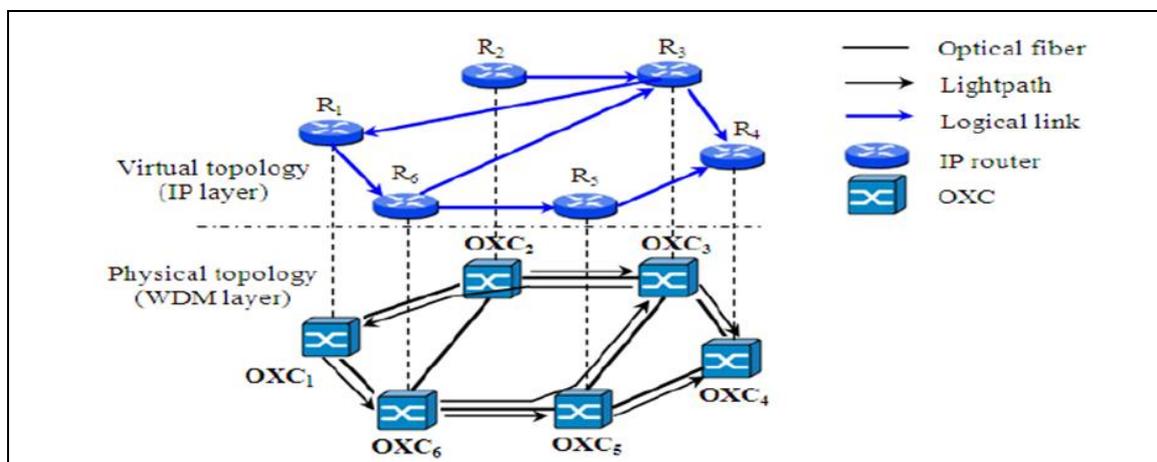


Ilustración 5: Típica estructura de red IP sobre WDM [46]

En la Tabla 11 se plantean dos posibles evoluciones que atañen a la convivencia y cooperación entre la red fotónica y la red IP. Información detallada se encuentra en la referencia [45].

Propuestas de evolución de la convivencia entre las capas óptica e IP
La primera de ellas propone que la inteligencia de red resida en la capa IP y se utilice la capa óptica únicamente para el transporte.
La segunda de ellas propone que la inteligencia de red resida compartida entre los “routers” IP y los OXCs.

Tabla 11: Propuestas de evolución de la convivencia de las capas óptica e IP

La primera propuesta puede considerarse un modelo cliente-servidor. En este caso la capa IP realiza la función de cliente y la capa DWDM la función de servidor. En este modelo la información de estado de los enlaces, el encaminamiento y señalización corresponden a la capa IP, que solicita el establecimiento de “*lightpaths*” a la capa WDM mediante interfaces (“*User Network Interface*”, UNI).

La segunda tendencia se conoce como modelo “*peer*”. En este modelo un plano de control gestiona tanto la capa IP como la malla fotónica. La información de estado de los enlaces, el encaminamiento y los protocolos de señalización se comparten entre ambas capas, que tienen una relación p2p. Mayor información puede consultarse en la referencia [46].

Una capa óptica con inteligencia de red permite que la recuperación ante fallos, mediante mecanismos de protección o restauración, sea más rápida en la capa óptica que si se resuelve a nivel IP mediante (“*Multiprotocol Label Switching*”, MPLS).

Hay dos tipos de mecanismos de encaminamiento utilizados en redes WSON de arquitectura IP sobre WDM, como presenta la Tabla 12:

Mecanismos de encaminamiento en redes WSON (IP sobre WDM)
El encaminamiento de “ <i>lightpaths</i> ” mediante algoritmos RWA en la capa óptica.
El encaminamiento de tráfico mediante protocolos IP sobre estos “ <i>lightpaths</i> ”.

Tabla 12: Mecanismos de encaminamiento en redes WSON (IP sobre WDM)

En este proyecto abordamos la estrategia del encaminamiento y asignación de longitud de onda (“ λ ”) en la capa óptica.

En el capítulo 4 se propone un algoritmo todo-óptico DRWA basado en el camino de menor coste con restricciones (“*Constraint Shortest-Path*”, CSP), que permite el establecimiento de “*lightpaths*” en redes WSON considerando los efectos físicos del medio.

2.6 Efectos físicos en redes WSON

2.6.1 Clasificación de los efectos físicos

Los efectos de la capa física pueden clasificarse en efectos lineales y no lineales:

- Los efectos lineales son independientes de la potencia de señal y afectan a cada canal óptico de forma independiente; es decir, afectan a todas las longitudes de onda por igual.
- Los efectos no lineales afectan a cada canal de forma individual, pero también causan perturbaciones e interferencias entre las distintas longitudes de onda coexistentes en un enlace.

En la Tabla 13 se enuncian los efectos físicos lineales:

Efectos físicos lineales principales	Acrónimo
Atenuación [45][51]	Att
Pérdidas de inserción [51]	IL
Ruido de emisión espontánea de amplificación [51][52]	ASE
Dispersión cromática / Dispersión de velocidad de grupo [45][51][52][53][54]	CD / GVD
Dispersión de modo de polarización [45][47][51][55][56]	PMD
Pérdidas dependientes de polarización [51]	PDL
Diafonía intracanal e intercanal [51]	XT
Concatenación de filtros [51]	FC

Tabla 13: Efectos físicos lineales

En la Tabla 14 se enuncian los efectos físicos no lineales:

Efectos físicos no lineales principales	Acrónimo
Automodulación de fase [57]	SPM
Modulación cruzada de fase [57]	XPM
Mezclado de cuatro ondas [58]	FWM
Esparcimiento estimulado Brillouin [52][57]	SBS
Esparcimiento estimulado Raman [52][57]	SRS

Tabla 14: Efectos físicos no lineales

2.6.2 Impacto de los efectos físicos

A medida que la señal óptica se propaga a través de elementos ópticos (“*Optical Network Element*”, ONE), pasivos o activos (filtros, demultiplexores y conmutadores), se produce una degradación de calidad de la misma. Tanto las características intrínsecas y de transmisión del medio óptico, como las imperfecciones de los equipos repercuten en la intensidad de la señal, en sus propiedades temporales, espectrales y de polarización [47].

La importancia de los efectos físicos para la transmisión de señales WDM o DWDM es variable. La magnitud de su impacto se conoce tanto por medio de modelos analíticos, como mediante simulaciones: VPI [48], OptSim [49], etc. Mediante simulación se evalúan fundamentalmente efectos lineales.

En la Tabla 15 se expone el impacto de los distintos efectos físicos, así como el comportamiento temporal de estos efectos y la conveniencia de la inclusión de estos efectos en el algoritmo de cómputo de caminos ópticos, de acuerdo al estándar RFC-4054 [45].

Limitación física	Varianza en el tiempo	Importancia en IA-RWA	Rango
Dispersión cromática	Estático	Alta	0-5000km/ns/km
Concatenación de filtros	Estático	Alta (según tipo ROADM)	0-10dB
OSNR	Dinámico	Alta	0-40dB
PMD	Estático	Alta (según formato modulación)	0-5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
FWM	Dinámico		
Non-linear phase Noise	Dinámico	Media	0-10 rad/s
SBS	Dinámico	Media	-
SPM	Dinámico	Media	0-10 rad/s
SRS	Dinámico	Media	-
WC-XT	Dinámico	Media	-
XPM	Dinámico	Media	-

Tabla 15: Impacto de los efectos físicos

Impacto de OSNR y PMD sobre el modelo de enlace simulado

A continuación se presentan los datos de máximo alcance obtenidos mediante simulación del modelo de enlace que se presenta en la Ilustración 6. Para mayor información sobre los parámetros de los elementos del enlace consúltese el capítulo 5, apartado 2.

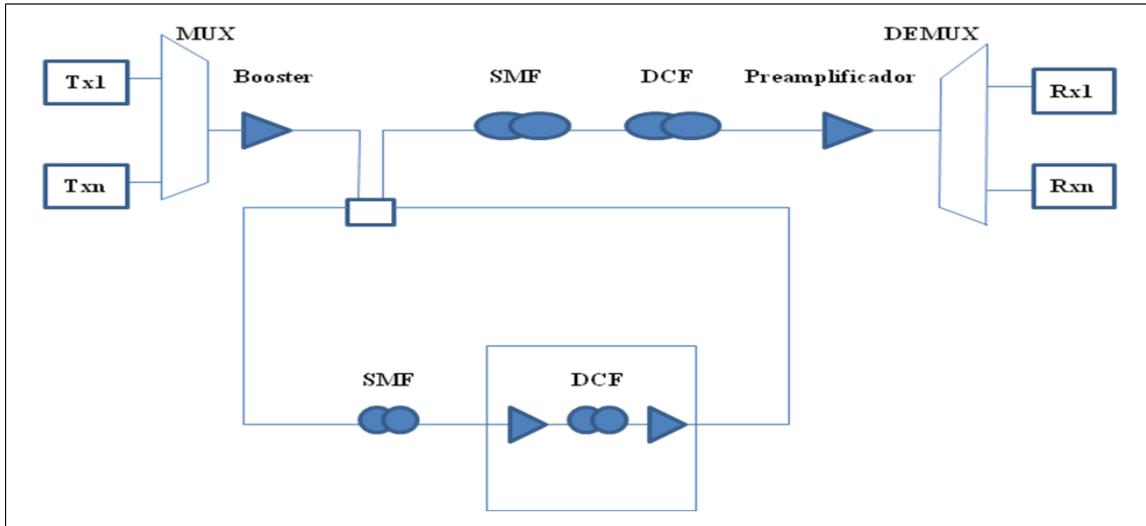


Ilustración 6: Modelo de enlace simulado

Los resultados de simulación en cuanto al impacto de los efectos físicos OSNR y PMD son los siguientes:

- A tasa de transmisión de 10 Gbps los efectos dispersivos de la PMD no tienen un fuerte impacto, y por lo tanto no se impone un requisito de máximo PMD. Sin embargo a 40 Gbps ó 100 Gbps con los formatos de modulación actuales el factor limitante es la PMD.
- A tasa de transmisión 10 Gbps y formato de modulación DQPSK el factor limitante es la OSNR. Pueden transmitirse “*lightpaths*” de hasta 25 vanos de 80 kilómetros para el modelo de enlace propuesto. Esto supone una distancia máxima de transmisión de 2000 kilómetros.

En la Ilustración 7 se muestra que a 10 Gbps - DQPSK el número de vanos máximo de transmisión es 24.

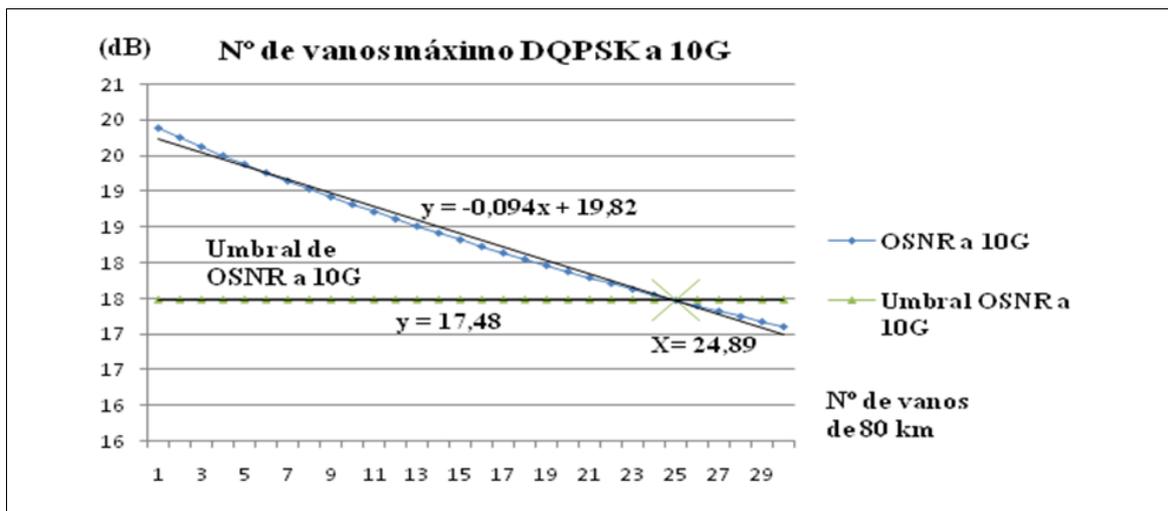


Ilustración 7: Número máximo de vanos transmitidos en DQPSK a 10 Gbps

La Ilustración 8 muestra el número máximo de vanos de transmisión para 40 Gbps – DQPSK obtenidos mediante el simulador realizado. Como se puede ver, se obtiene un alcance de 11 vanos, lo que equivale a 880 kilómetros como distancia máxima de transmisión.

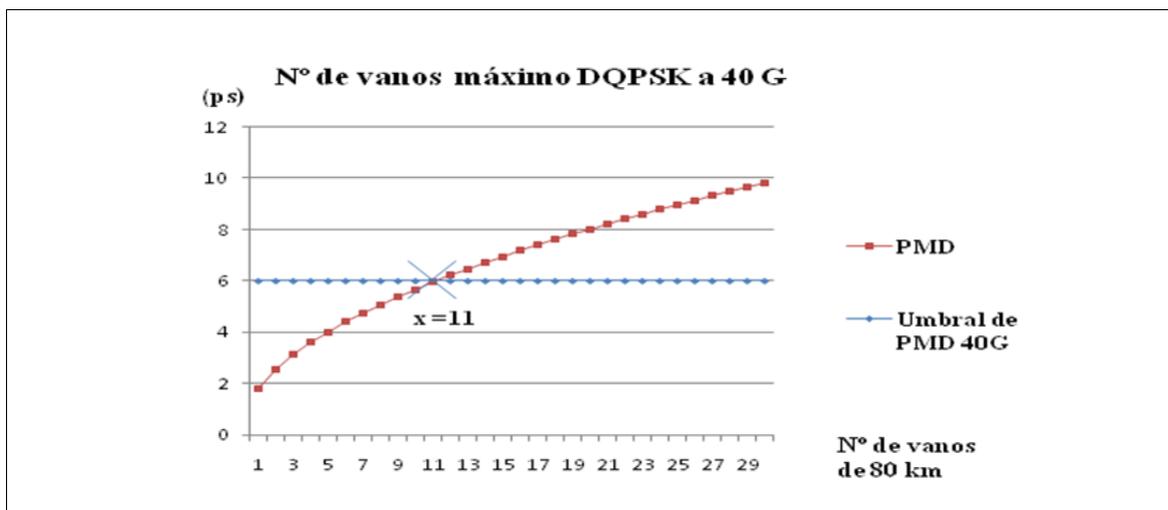


Ilustración 8: Número de vanos máximos DQPSK a 40 Gbps

Impacto de ROADMs intermedios

Puede observarse en la Ilustración 9, de acuerdo a los resultados numéricos de simulaciones obtenidos mediante el simulador VPI [50], la presencia de ROADMs intermedios tiene un impacto en el alcance.

Para 40 Gbps, con coeficiente de dispersión de modo polarización ($DPMD = 0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$), el alcance máximo sin ROADMs intermedios es de 7 vanos (560 km),

mientras que, considerando el impacto de ROADMs para la inserción y extracción de canales, el alcance disminuye a la mitad 3.5 vanos (hasta 280 km).

No obstante, el impacto de ROADMs intermedios depende de la tecnología de filtrado.

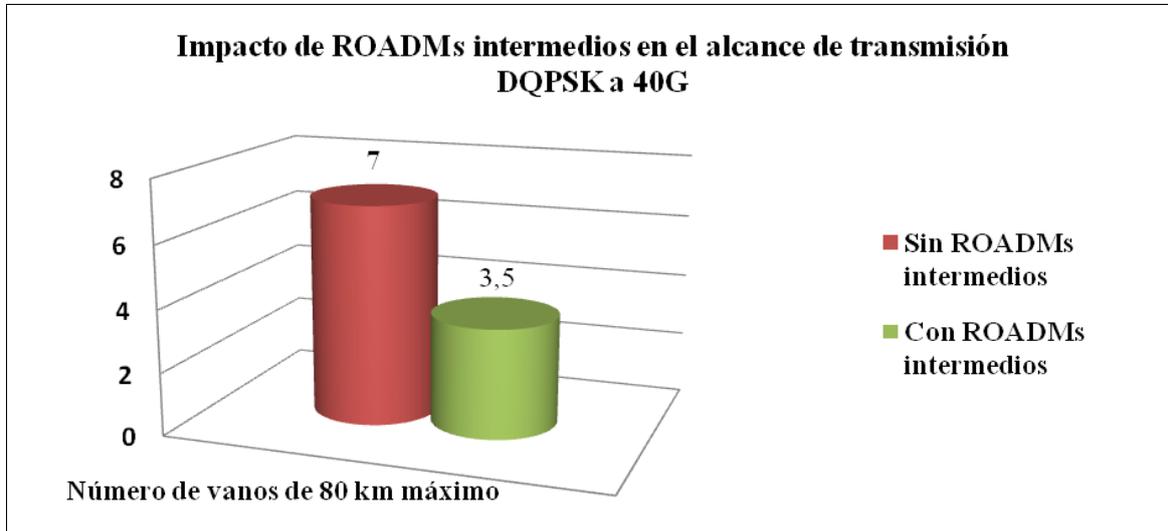


Ilustración 9: Impacto del alcance DQPSK a 40 Gbps obtenido mediante simulación VPI-TID [50]

Este proyecto considera el impacto de los efectos físicos en el problema DRWA. El algoritmo en tiempo real debe garantizar la calidad de los “*lightpaths*”. Para ello deben considerarse fenómenos físicos de impacto considerable de modo que su diseño sea realista respecto a la transmisión a través de un medio no ideal y su funcionalidad eficaz.

De acuerdo a la RFC-4054 es conveniente considerar los siguientes efectos físicos en la algoritmia DRWA [45]:

- Efectos físicos de dispersión cromática, concatenación de filtros (aunque dependiendo de la tecnología de filtrado), OSNR, y PMD, que se consideran de gran impacto.
- Efectos no lineales como FWM, SPM, y XPM, que se consideran de importancia media.

El impacto de los efectos nocivos de la capa física sobre la calidad de transmisión de señal, (“*Quality of Transmission*”, QoT), está condicionado por las características de transmisión presentadas en la Tabla 16:

Características de transmisión que condicionan el impacto de los efectos físicos
Velocidad de transmisión.
Formato de modulación.

Características de los amplificadores ópticos, (“ <i>Optical Amplifier</i> ”, OA).
Número de canales transmitidos.
Tecnología de ROADMs intermedios.
Potencia de señal inyectada en el transmisor.
Longitud de vano.

Tabla 16: Características de transmisión que condicionan el impacto de los efectos físicos

La tendencia para el despliegue de red es la selección de formatos de modulación con alta inmunidad frente a errores, que permitan disminuir la OSNR objetivo.

En la Tabla 17 se exponen las limitaciones en la transmisión que imponen los efectos nocivos de la capa física:

Limitaciones debidas a los efectos físicos
Limitación en alcance total o número de vanos sin regeneración.
Limitación de la longitud de cada vano.
Necesidad de módulos compensadores de dispersión.
Limitación en la potencia máxima inyectada por canal.

Tabla 17: Limitaciones debidas a los efectos físicos

Existen estudios que analizan cual es la longitud de vano adecuada para la obtención de un mayor alcance extremo a extremo. Son viables longitudes de vano entre 60 y 120 (km). En las gráficas se han considerado vanos de 80 (km), que es la longitud estandarizada de facto.

La calidad de la fibra, el número de canales ocupados y el ancho de rejilla (relacionado con la velocidad de transmisión) son factores que tienen una influencia directa en el impacto de los efectos físicos en la transmisión de señal en redes ópticas WRON.

El alcance máximo presentado puede mejorarse a medida que se renueve la tecnología de equipos desplegados, así como por los avances tecnológicos que van llegando al mercado. Por ello los resultados obtenidos deben considerarse de forma cualitativa.

2.6.3 Descripción de los efectos físicos

2.6.3.1 Atenuación

El fenómeno de la atenuación produce una pérdida de la potencia de señal transmitida. Para compensar la atenuación se requiere de elementos amplificadores. Se produce atenuación de señal en todos los elementos pasivos de la red.

En este proyecto se ha considerado la atenuación de la fibra, mediante la siguiente relación [59]:

$$Att(dB) = \alpha \left(\frac{dB}{km} \right) * L(km)$$

Sea:

- L: la longitud de fibra (km).
- α : el coeficiente de atenuación de la fibra (dB/km).

2.6.3.2 Emisión Espontánea de Ruido

Las pérdidas progresivas que sufre la señal en su transcurso a través de los nodos y a través de los segmentos de fibra, hace necesaria la introducción de OA en el diseño de red [60].

En amplificadores dopados de fibra de erbio (“*Erbium doped fiber amplifiers*”, EDFA) el actual espaciado entre amplificadores está en el rango de los 80-120 km, mientras que para los amplificadores tipo Raman, (“*Raman Amplifier*”, RA), el rango es de 100-160 (km) [61].

Tradicionalmente se han utilizado en los sistemas WDM los amplificadores EDFA. En todos los proyectos de fibra óptica existentes se utilizan amplificadores de este tipo, por lo que en este proyecto se consideran y simulan sus efectos.

La amplificación óptica mediante EDFA no es posible sin la generación espontánea de ruido (“*Amplified Spontaneous Emission*”, ASE). Este efecto es de carácter severo sobre los enlaces, degradando la OSNR.

El ruido generado en amplificadores EDFA se cuantifica mediante un factor característico del amplificador, como es la figura de ruido (“*Noise Figure*”, NF). Este efecto determina la pérdida de OSNR en dicho amplificador. Se expresa en dB [45].

- Cada EDFA contribuye con una potencia de emisión espontánea de ruido [61]:

$$P_{ASE} = hv \Delta\nu F(G - 1)$$

- Donde:
 - $\hbar = 6.62606896 * 10^{-34} J \cdot s$ es la constante de Planck,
 - F es el factor ruido del amplificador que se aproxima como dos veces el factor de emisión espontánea (parámetro característico del amplificador, $F \sim 2n_{sp}$),
 - $\Delta\nu$ es el ancho de banda óptico del canal, que depende del ancho de banda eléctrico y éste a su vez del formato de modulación.

La potencia de ruido ASE es un efecto acumulativo a lo largo de los vanos de transmisión. Cada amplificador genera una cierta potencia de ruido ASE, pero además este efecto se suma a la potencia de ruido que ya se propaga a través de la fibra. La potencia de ruido ASE propagada está sujeta a la atenuación del tramo de fibra $L_f(k)$, así como a la ganancia del amplificador $G_{EDFA}(k)$.

$$P_{ASE}(k)_{acumulado} = P_{ASE}(k-1) * L_f(k) * G_{EDFA}(k) + P_{ASE}(k)_{generado}$$

Donde:

- $k=1..N$ es el número del amplificador de la red.

El efecto degradante del ASE en recepción se manifiesta como una pérdida de OSNR respecto al inicio de transmisión. Adicionalmente a la fórmula a continuación habría que considerar otros efectos que también pueden degradar la OSNR.

$$OSNR_{reception} = \frac{P_{signal\ reception}}{P_{ASE\ reception}}$$

La gestión del ruido en amplificación limita el alcance y capacidad del sistema, por lo que junto con la gestión de la dispersión son dos de las consideraciones más importantes en el diseño de sistemas de transmisión UL Y ULH de alta capacidad.

2.6.3.3 Dispersión Cromática

La dispersión cromática tiene lugar debido a la dependencia del índice de refracción de la señal óptica con la longitud de onda (" λ "). Como resultado de la dispersión cromática, diferentes frecuencias de luz, viajan a distintas velocidades. Esto causa una reducción de la energía de los pulsos ópticos del dentro del periodo de bit, que se desplaza fuera de dicho periodo [62][63].

El ensanchamiento de los pulsos más allá de su periodo de bit puede producir interferencia entre símbolos, ("*Intersymbol Interference*", ISI), dificultando la decodificación de los símbolos en el receptor; es decir, aumenta la BER.

La máxima dispersión cromática admisible depende de los detalles de formato de modulación y diseño de la circuitería del receptor.

La dispersión cromática puede ser compensada adecuadamente (aunque no óptimamente) por enlace, y/o durante el diseño de la línea de transmisión. Para mayor información consúltense referencias [45][52][53] y [54].

En este proyecto la dispersión cromática se considera compensada mediante módulos DCM.

2.6.3.4 Dispersión Cromática Residual

El fenómeno de la dispersión cromática residual, (“*Residual Dispersion*”, RD), resulta de la no coincidencia entre las pendientes de la fibra de transporte SMF (de dispersión positiva), y la fibra compensadora de dispersión negativa, DCF.

En la ITU-T G.680 se indican dos posibles métodos para la evaluación de RD:

- Considerando el caso peor y estableciendo unos límites máximo y mínimo de RD.
- Mediante una evaluación estadística, para la cual se necesita al menos la media y la desviación estándar asumiendo una distribución gaussiana.

En la Ilustración 10 se observa que en la longitud de onda central, (“ λ_c ”), para la cual está configurado el módulo compensador, la dispersión cromática residual es cero. Las longitudes de onda centrales (de 1-8 λ s) son las que mejor se acomodan a los umbrales máximo y mínimo de RD.

A medida que se aleja la longitud de onda (“ λ_j ”) de la longitud de onda central (“ λ_c ”) la dispersión residual tras la compensación es mayor. Las longitudes de onda (“ λ_s ”) en los extremos se encuentran fuera de los límites permitidos de RD.

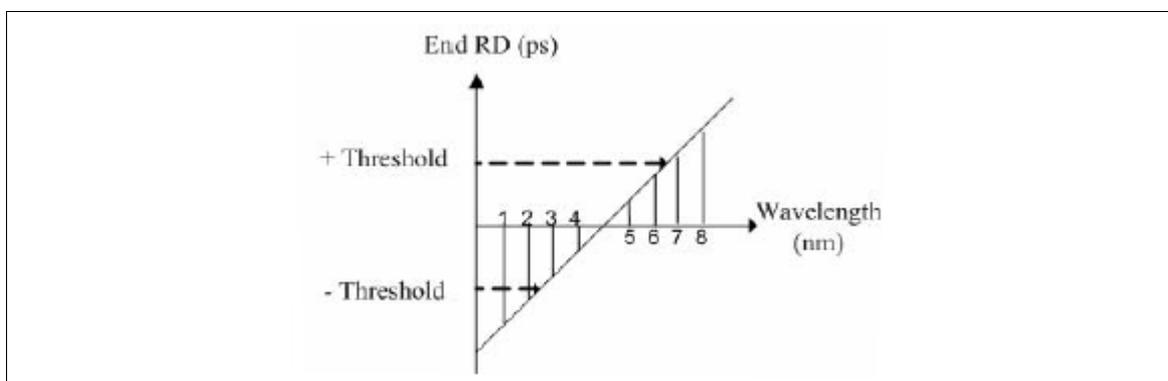


Ilustración 10: Umbral de la dispersión cromática residual [54]

2.6.3.5 Dispersión de Modo de Polarización

Aunque la PMD es poco importante para la transmisión a 10 Gbps, es un efecto crítico para la transmisión a 40 Gbps y sobre todo para 100 Gbps. Se puede consultar resultados de investigación sobre el efecto de PMD a altas velocidades en las referencias [45][47] y [55].

La PMD ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, llamados modos de polarización (“*States of Polarization*”, SOPs), del modo fundamental de propagación (HE_{11}), viajan a distinta velocidad de grupo, llegando en instantes de tiempo distintos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos.

La variación de la velocidad de grupo se produce por las características birrefringentes del medio de transmisión, que es la fibra óptica. La birrefringencia consiste en el cambio de índice de refracción (n) de los ejes transversales de la fibra óptica. Esto significa que cada modo de polarización de la luz se propagará a lo largo de la fibra óptica con un valor distinto de índice de refracción. La señal se comportará como dos ondas independientes que viajan a velocidades independientes a lo largo de la fibra óptica.

Los efectos DGD y PMD pueden causar variación de la potencia óptica, distorsión, ISI, y desvanecimiento de la relación señal a ruido óptica, OSNR. En la literatura se describe este impacto. Para mayor información consúltense [64][65][66] y [67].

Este efecto se acentúa a medida que se concatenan de segmentos. La PMD es uno de los parámetros que tendrá que considerarse en la realización de algoritmos RWA en tiempo real.

En este proyecto se simula el efecto de la PMD de la siguiente manera:

- Se calcula la PMD total a lo largo de todo el camino como el producto del coeficiente de PMD por la raíz cuadrada de la distancia.

$$PMD = D_{PMD} * \sqrt{d}$$

- Donde:
 - D_{PMD} es el coeficiente de dispersión (ps/\sqrt{km}).
 - d es la distancia (km).

2.6.3.6 Concatenación de Filtros

La concatenación de filtros, FC, es el último efecto lineal considerado. Cuantos más componentes que producen filtrado del ancho de banda de señal, (como los ROADMs), se concatenen a lo largo del “*lightpath*”, mayor será el estrechamiento de la banda de paso efectiva de los filtros sobre cada canal óptico. Efecto descrito en [45].

Esta concatenación también puede hacer al sistema de transmisión susceptible de desalineación de la banda de paso de los filtros, debido a imperfecciones de los equipos, variaciones de temperatura y envejecimiento.

El filtrado se realiza en los conmutadores-selectores de longitud de onda (“*Wavelength Selective Switch*”, WSS) que pueden ser de tipo (“*Micro – Electro - Mechanical Systems*”, MEMS), (“*Liquid Crystal on Silicon*”, LCOS), etc.

La importancia de este efecto depende de la tecnología de filtrado. El impacto sobre la tecnología de filtrado LCOS es despreciable. Sin embargo el impacto de la conmutación en los WSS sobre la tecnología de filtrado MEMS disminuye el ancho de banda de la señal transmitida por lo que debe considerarse en la algoritmia DRWA debido a la pérdida de calidad de señal que produce.

En la Ilustración 11 se observa el efecto de filtrado para la tecnología de WSS de Tellabs [18]. El impacto es significativo a medida que se concatenan vanos de transmisión.

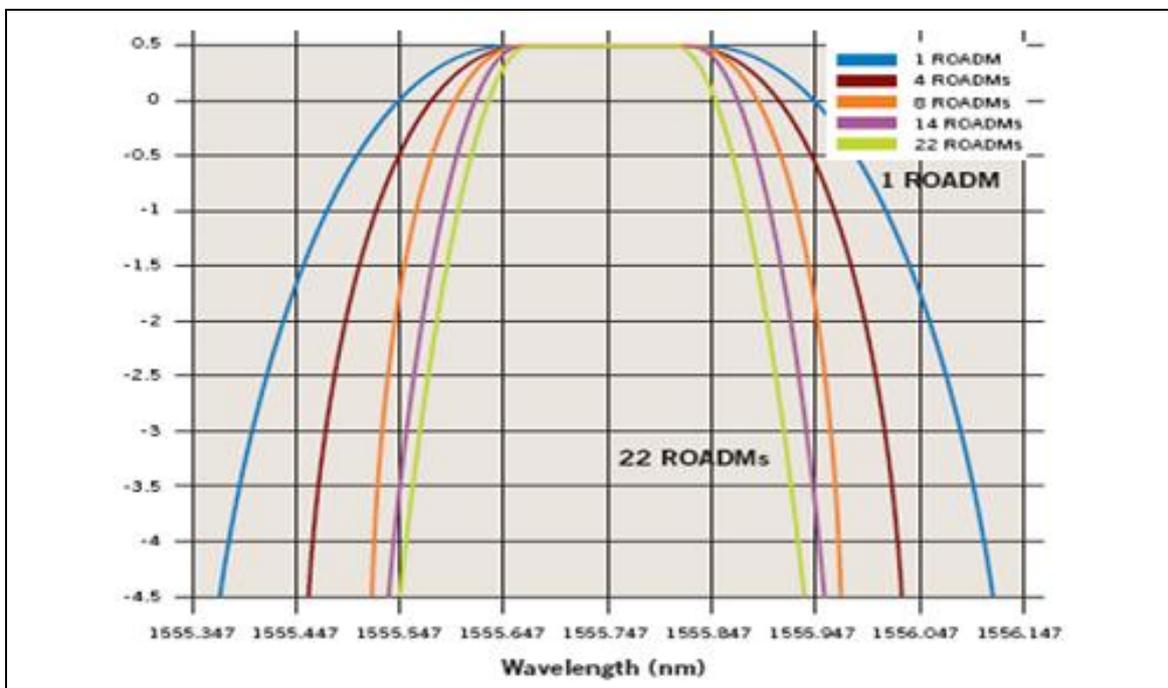


Ilustración 11: Impacto del filtrado por concatenación de ROADMs [18]

2.6.3.7 Efectos físicos no lineales

La respuesta de un medio como la fibra óptica es una función no lineal de la amplitud de los campos magnéticos y eléctricos aplicados, por lo tanto, se producen fenómenos electromagnéticos no lineales en el medio.

Las no linealidades son inherentes, y ya descritas por las ecuaciones de Maxwell, mediante la inclusión de un término de polarización no lineal. Mayor información se encuentra en las referencias [68][69] y [70]. A continuación se describen brevemente fenómenos físicos no lineales relevantes:

- El mezclado de cuatro ondas (“*Four Wave Mixing*”, FWM) se produce en la transmisión multicanal debido al batido de la señal a diferentes frecuencias, que provoca modulación de fase de los canales, y por lo tanto generación de modulación a nuevas frecuencias; es una distorsión intercanal equivalente a la intermodulación en sistemas eléctricos. El efecto de FWM disminuye a medida que aumenta el espaciado intercanal. Este efecto y su impacto se estudian en [71][72] y [73].
- La automodulación de fase, (“*Self Phase Modulation*”, SPM), es el cambio de fase de un canal debido a su propia intensidad (es un fenómeno intracanal). El pico de potencia del pulso de señal aumenta el índice de refracción del silicio, produciendo una velocidad de grupo inferior que causa automodulación. Este desplazamiento en fase no lineal se manifiesta como modulación de fase. Para mayor información consular referencia [74].
- La modulación cruzada de fase, (“*Cross Phase Modulation*”, XPM), se produce por una modulación de la señal debido a la intensidad de otras señales, por lo tanto es un fenómeno intercanal. Los fenómenos de SPM y XPM se acentúan al aumentar la tasa de bits y por lo tanto la potencia óptica. (Para mayor detalle consular [52]).
- El esparcimiento estimulado Brillouin (“*Stimulated Brillouin Scattering*”, SBS) y el esparcimiento estimulado Raman (“*Stimulated Raman Scattering*”, SRS) involucran mecanismos inelásticos. El impacto de estos efectos supone una limitación en la potencia óptica que puede ser inyectada en un enlace óptico. Dichos fenómenos se explican más extensamente en las referencias [52] y [57].

2.7 Parámetros para estimar la calidad de señal

Para asegurar la bonanza de transmisión de los caminos ópticos calculados en tiempo real, se requieren de parámetros para estimar la calidad de señal. Estos parámetros se realizan a partir del impacto de fenómenos físicos conocidos. Fundamentalmente se mide la QoT bajo dos parámetros:

- OSNR.
- Factor Q.

Ambos parámetros están relacionados entre sí, ya que se refieren a la relación señal a ruido óptica y eléctrica respectivamente. Para mayor información consúltese la referencia [75].

Estos dos criterios son la base para la inclusión de los efectos físicos en el problema de cómputo de caminos ópticos en tiempo real, PLI-DRWA.

Mediante los parámetros de OSNR o factor Q, se puede garantizar que la BER en el receptor no supere un cierto umbral, por ejemplo 10^{-4} antes de la corrección FEC.

Esto es posible porque ambos parámetros están relacionados analíticamente con la BER, por lo que hay una implicación directa entre ambos fenómenos. A mayor OSNR o mayor factor Q, menor es la BER.

Existen multitud de criterios en la literatura a la hora de estimar el factor Q, como veremos en capítulos más adelante [76].

$$Q(k) \geq Q_{\text{min}}, k=1,2, \dots, M, \text{ representa el número de vano.}$$

De la misma manera para calcular la OSNR de un camino se tiene en cuenta el efecto de emisión de ruido espontánea de amplificadores, ASE, así como otras degradaciones lineales y no lineales, que pueden interpretarse como un margen en la OSNR objetivo, $OSNR_{\text{min}}$ [53].

$$OSNR(k) \geq OSNR_{\text{min}}, k=1,2, \dots, M, \text{ representa el número de vano.}$$

El parámetro recogido en los recientes estándares internacionales es el de OSNR. Para la estimación de calidad mediante la OSNR se completa la medida con otros parámetros de forma independiente, principalmente PMD [45].

2.7.1 Relación Señal a Ruido Óptica

El principal efecto físico considerado en la degradación de calidad de la señal transmitida es la emisión espontánea de ruido.

Este efecto puede estimarse en términos de la (“*Optical Signal to Noise Ratio*”, OSNR), por la relación entre la potencia de señal óptica por canal (S) y la potencia de emisión espontánea de ruido en el ancho de banda óptico especificado (N), normalmente tomado por convención como 0.1 nanómetros (nm). Se mide en decibelios (dB) [77].

$$OSNR = 10 * \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right)$$

En la Ilustración 12, se observa un ejemplo de pulsos de señal WDM transmitida así como el ruido que se transmite en toda la banda. La relación entre ambas señales constituye la OSNR.

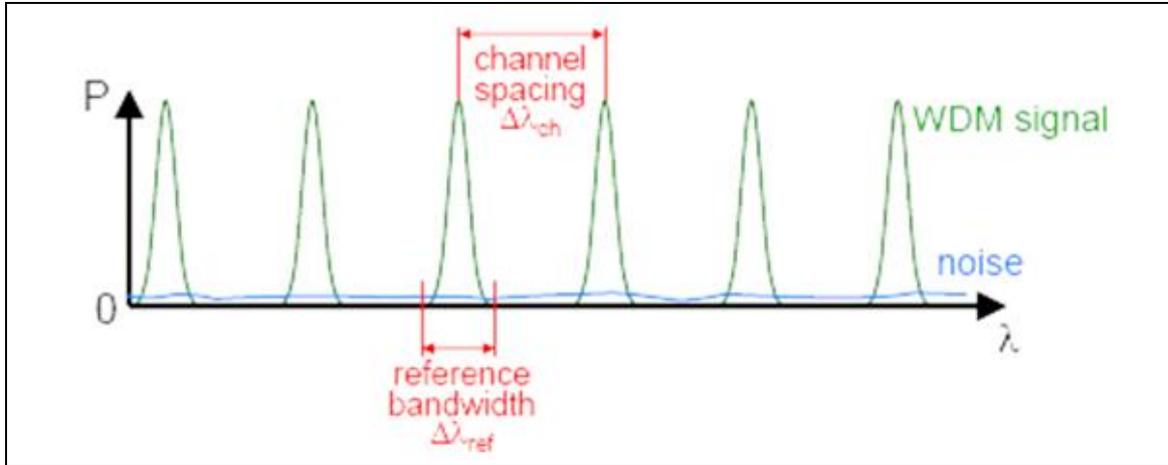


Ilustración 12: Relación Señal a Ruido Óptica en la transmisión óptica WDM [77]

La OSNR es un parámetro fundamental en el problema DRWA, ya que permite aproximar la calidad de señal transmitida a partir de la potencia de señal y la potencia de ruido generado por efectos como ASE, XPM, SPM, FWM, etc.

Una técnica adecuada para incluir el impacto de dichos efectos en la pérdida de calidad de señal es establecer un margen en la OSNR objetivo del sistema. Dicho margen debe ser suficiente para garantizar la bonanza de los “*lightpaths*” establecidos, a través de un medio físico no ideal.

Para garantizar criterios de calidad de los “*lightpaths*” debe cumplirse una OSNR mínima u OSNR objetivo a través de ellos.

La OSNR objetivo debe ser suficiente para conseguir el funcionamiento del sistema deseado, que para sistemas comerciales es una BER de 10^{-15} de forma efectiva, sin errores.

2.7.2 Factor de Calidad o factor Q

El factor de calidad o factor Q es un parámetro que permite establecer una medida fiable de la calidad e integridad de una señal eléctrica (que no es más que la señal de transmisión óptica convertida a señal eléctrica).

Este parámetro es utilizado ampliamente en una serie de algoritmos DRWA de nueva generación que consideran el impacto de los efectos físicos sobre la calidad de señal transmitida.

Se utiliza de forma similar al parámetro de OSNR estableciendo un factor Q objetivo que garantiza la bonanza de los “*lightpaths*”.

Para considerar efectos lineales y no lineales en la pérdida de calidad de señal es adecuado establecer un margen en el factor Q objetivo del sistema.

El factor Q objetivo debe ser suficiente para conseguir el funcionamiento del sistema deseado, que para sistemas comerciales es una BER de 10^{-15} de forma efectiva, sin errores.

CAPÍTULO III

3. Algoritmos RWA en tiempo real

3.1 Clasificación de demandas de tráfico

La matriz de demandas de tráfico se clasifica de acuerdo a lo recogido por S. Azodolmolky [40] en tipos de demanda:

- Estática o Permanente (“*Permanent Lightpath Demands*”, PLD).
- Dinámica (“*Dynamic Lightpath Demands*”, DLD).

Las demandas dinámicas se dividen en demandas incrementales (“*Scheduled Lightpath Demands*”, SLD) o completamente dinámicas (“*Ad-hoc Lightpath Demands*”, ALD). Esta clasificación se representa en la Ilustración 13:

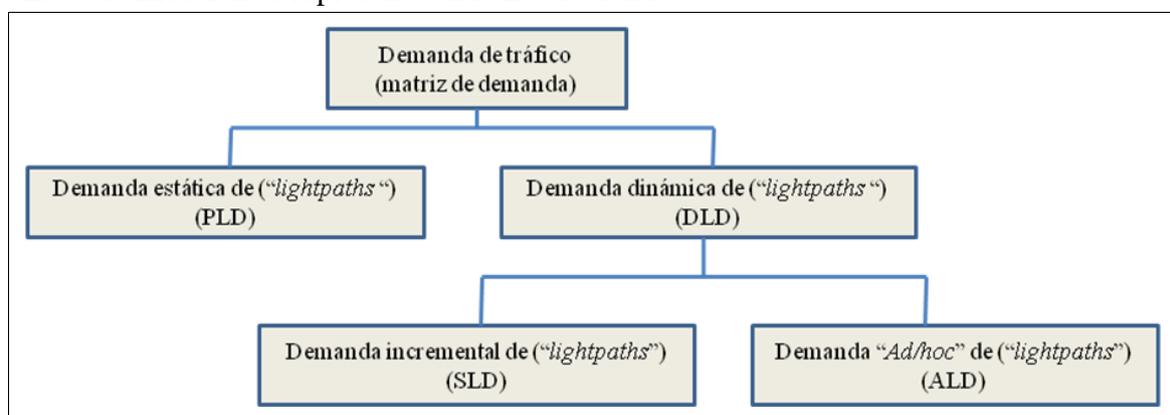


Ilustración 13: Tipos de conjuntos de demandas de tráfico

Una demanda de tipo estática o PLD se caracteriza porque el conjunto de la demanda es conocida. Esto permite optimizar la asignación de recursos para cada una de las peticiones de la demanda en el ámbito de planificación de red. Su gestión se realiza “*off-line*”.

En el caso de que la matriz de tráfico sea dinámica o DLD, el proceso de llegada de peticiones a la red troncal se modela mediante un proceso aleatorio. La red establece “*lightpaths*” en tiempo real u “*on-line*” dependiendo del estado de red en el instante de llegada de petición, puesto que la demanda total no es conocida.

Dado que la red carece de información de la totalidad de la demanda para el procesamiento de peticiones, el problema dinámico o DLD es más restrictivo que el caso estático. Más aún, el tiempo de procesamiento admisible en el caso dinámico es del orden de milisegundos. Por esta razón es adecuada la resolución del problema DRWA mediante algoritmos heurísticos, (“*Heuristic Algorithm*”, HA), o genética, (“*Genetic Algorithm*”, GA).

La esencia del método heurístico es la ausencia de un método formal estricto y la presencia de criterios empíricos, tales como el uso de prueba y error y la aceptación como solución final, de algo que no necesariamente es lo óptimo, pero que trabaja como solución y con una economía de tiempo aceptable.

Los algoritmos genéticos son procedimientos adaptativos que a lo largo del tiempo, transforman un conjunto de objetos matemáticos individuales, usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto.

Adicionalmente se realiza una diferenciación entre las demandas dinámicas, dependiendo del tiempo de permanencia de los “*lightpaths*”. En una matriz de tráfico SLD los “*lightpaths*” se establecen de forma permanente. Sin embargo, si la demanda es de tipo ALD los “*lightpaths*” se establecen por tiempo limitado, y el tiempo de permanencia se modela con un proceso aleatorio.

En este proyecto se evalúa el problema DRWA para una demanda dinámica de tipo incremental. Se considera que los “*lightpaths*” permanecen establecidos el suficiente tiempo como para considerarse permanentes durante simulación.

3.2 Descripción del problema DRWA clásico y limitaciones

El problema DRWA consiste en el cómputo y reserva de “*lightpaths*” en tiempo real, para los flujos agregados de datos que lleguen a la red troncal conmutada fotónica, WRON. La secuencia completa se observa en la Ilustración 14.

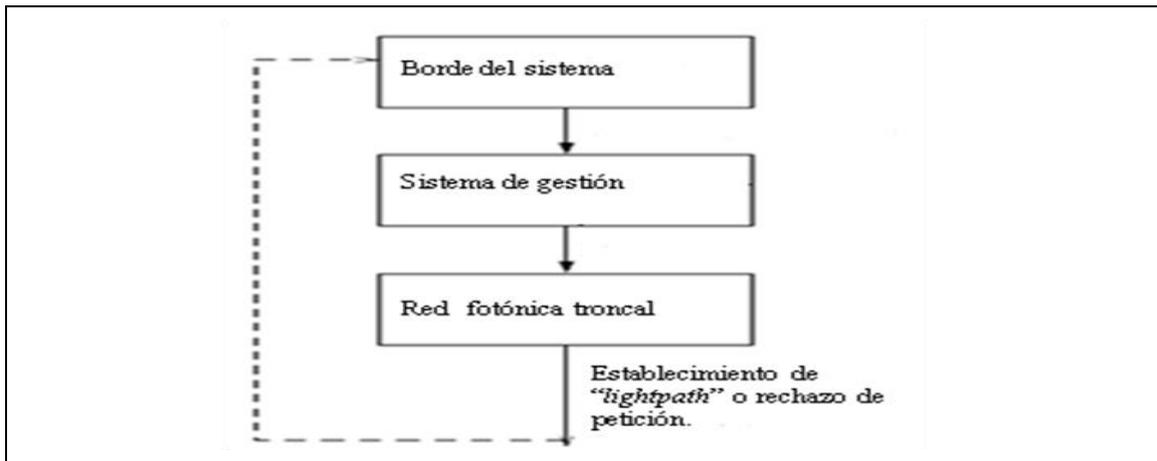


Ilustración 14: Secuencia de establecimiento de un "lightpath" en tiempo real

En las redes WRON se reciben peticiones de conexión en la red troncal, entre pares de nodos origen-destino provenientes del borde del sistema. Estas solicitudes de conexión se atienden en tiempo real mediante algoritmia DRWA; estableciendo "lightpaths" a lo largo de una ruta mediante una longitud de onda, (" λ "), o canal disponible.

Un elemento de gestión, con información del estado de la red, podría ejecutar el algoritmo DRWA proporcionando una ruta lógica y una longitud de onda, (" λ "), disponible para establecer un "lightpath" a través de la red troncal fotónica. En el caso de que no hubiese recursos de red disponibles la solicitud de conexión se rechaza.

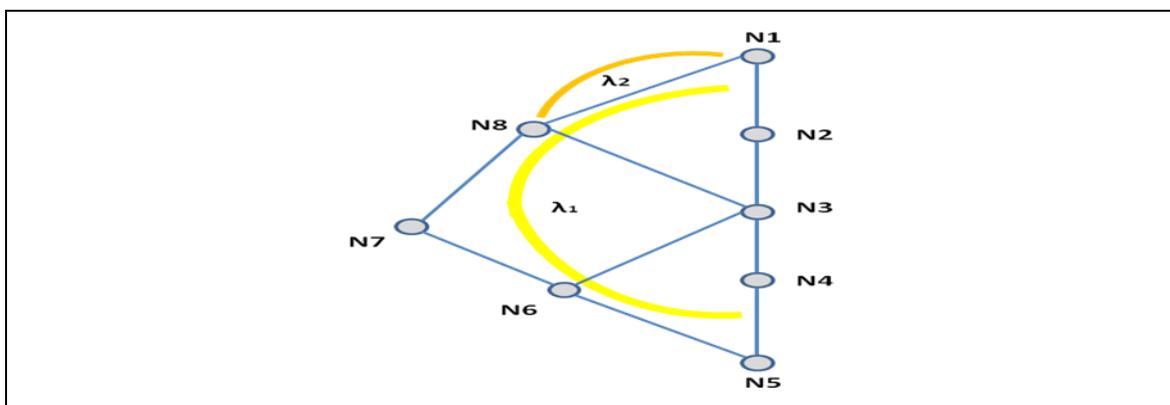


Ilustración 15: "Lightpaths" sobre red óptica conmutada

De la Ilustración 15 es posible deducir que se produce una solicitud de conexión entre los nodos N1 y N5, que se resuelve mediante la asignación de la ruta N1-N8-N7-N6-N5 y de la longitud de onda (" λ_1 ").

En segundo lugar se produce una nueva solicitud de conexión entre los nodos N1 y N8, que se procesa mediante un enlace directo entre ambos nodos y a través de la longitud de onda (" λ_2 ").

Este proyecto afronta el problema DRWA mediante la división del mismo en dos tareas separadas: el encaminamiento y la selección de longitud de onda, (“ λ ”). Ambas tareas se describen en la Tabla 18:

Tarea	Descripción
Encaminamiento (“Routing”, R)	Tarea cuyo objetivo es encontrar la ruta completa desde el nodo origen al nodo destino que se asignará a la petición.
Selección de longitud de onda (“Wavelength Assignment”, WA)	Tarea mediante la cual se elige la longitud de onda, (“ λ ”), que se asignará a la petición.

Tabla 18: Tareas DRWA

En los siguientes apartados se clasifican y describen un conjunto de técnicas que adoptan este mismo criterio, por lo que se conoce como técnicas (R+WA). Una pequeña sección posterior describe técnicas conjuntas RWA.

En este proyecto se aborda la resolución del problema DRWA mediante algoritmia heurística, caracterizada por su viabilidad computacional y limitación en retardo. Ambas condiciones son imprescindibles para una implementación en entorno real (no emulado).

El conjunto de técnicas descritas bajo la denominación de técnicas clásicas se caracterizan porque no consideran el impacto de los efectos de la capa física sobre la transmisión óptica.

Consideraciones	Descripción
La restricción de continuidad de longitud de onda, (“ λ ”).	Se requiere de una misma longitud de onda disponible o canal óptico a través de todos los nodos del camino computado entre los nodos origen-destino, para establecer un “lightpath” a través de los mismos.
Un único dominio de transparencia o isla suministrador.	Supone igualdad de preferencia de todos los nodos y enlaces de la red, sin restricciones adicionales por tratarse de diferentes OC.
Bonanza física de los “lightpaths”.	No se requiere el uso de regeneración de señal, 3R, en la algoritmia. No se considera el impacto de los fenómenos físicos.

Tabla 19: Consideraciones del problema DRWA clásico

El problema DRWA clásico ha sido ampliamente estudiado. D. Gerstel [78] propone técnicas clásicas y heurísticas de asignación de longitud de onda, (“ λ ”), mientras que H.

Zang [79] realiza un resumen de técnicas clásicas y heurísticas tanto de encaminamiento como de asignación de longitud de onda, (“ λ ”), en WRON.

Las consideraciones del problema DRWA clásico se exponen en la Tabla 19.

La restricción de continuidad puede salvarse en presencia de convertidores de longitud de onda. Sin embargo, en este proyecto se ha mantenido el criterio de continuidad. No se han considerado criterios en la función de coste derivados de entornos multisuministrador.

Limitaciones

La principal limitación del problema DRWA clásico es la consideración de viabilidad física de todas las rutas de la red WRON. Esta asunción no se ajusta a la realidad del impacto de los efectos físicos sobre la calidad de señal transmitida. Aplicado al tiempo real, un algoritmo clásico que no considere las restricciones físicas en su diseño no puede proporcionar una solución eficaz para una implementación en entorno real (no emulado).

En apartados posteriores se evaluarán las nuevas tendencias que incluyen criterios físicos en la algoritmia DRWA.

En entornos reales, para mejorar el alcance es necesario el empleo de regeneración (3R).

3.3 Metodologías de encaminamiento clásicas

Las técnicas heurísticas clásicas de encaminamiento han presentado a lo largo del tiempo tres tendencias con diferente grado de utilización de la información de estado de la red, que se exponen en la Tabla 20:

Clasificación de estrategias de encaminamiento clásicas
Encaminamiento fijo (“ <i>Fix Routing</i> ”, FR).
Encaminamiento fijo-alternado (“ <i>Fix – Alternate Routing</i> ”, FAR).
Encaminamiento adaptativo (“ <i>Alternate Routing</i> ”, AR).

Tabla 20: Clasificación de estrategias de encaminamiento clásicas

Mediante la estrategia de encaminamiento fijo, FR, se calcula una sola ruta a través de la red, a partir de una función de coste precalculada “*off-line*” y fija. Si mediante la ruta calculada no es viable el establecimiento del “*lightpath*” deseado, la petición se rechaza.

En la estrategia de encaminamiento fijo-alternado, FAR, se precálculan (“k”) caminos mediante una función de coste fija. Si mediante el primero de ellos no pudiera establecerse el “*lightpath*” deseado se recurriría al siguiente y así sucesivamente hasta agotar los (“k”) caminos. Mediante la estrategia FAR aumenta la eficiencia de red, disminuyendo la probabilidad de bloqueo. Esta estrategia se estudia en la referencia [79]. Se atribuyen buenos resultados en la literatura a partir de (“k”) igual a 3.

El encaminamiento adaptativo, AR, es de tipo dinámico a diferencia de las estrategias anteriores. Consiste en el cálculo de la función de coste por enlace en tiempo real, actualizándose tras el establecimiento o finalización de alguna conexión. Se considera información del estado de la red en la función de coste.

En la Tabla 21 se describe el objetivo de las tres estrategias de encaminamiento presentadas:

Técnica	Objetivo
Encaminamiento fijo	- Minimiza el tiempo de establecimiento de conexión en tiempo real a costa de una mayor probabilidad de bloqueo.
Encaminamiento fijo-alternado	- Mejora la capacidad de red con un tiempo de conexión algo mayor al computar (“k”) rutas. - Mejora la probabilidad de bloqueo.
Encaminamiento adaptativo	- Requiere el mayor tiempo de establecimiento de conexión ya que recalcula el coste por enlace dinámicamente. - Minimiza la probabilidad de bloqueo.

Tabla 21: Descripción de estrategias de encaminamiento

3.4 Clasificación de algoritmos clásicos de encaminamiento

En la Tabla 22 se presenta una selección de técnicas de encaminamiento clásicas que pueden clasificarse bajo los criterios de flexibilidad expuestos anteriormente, y son tratadas más adelante con mayor detalle:

Algoritmo	Estrategia	Objetivo	Clasificación
1. “Shortest Path”, SP [80].	Minimiza el coste total del camino.	Mínimo consumo de recursos.	Fijo o fijo alternado

2. "Hop Weight", HW [81].	Selecciona el camino de mínimo número de saltos.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.	Fijo o fijo alternado
3. "Distance Weight", DW [81].	Selecciona el camino de mínima distancia en microsegundos.	Minimiza el retardo.	Fijo o fijo alternado
4. "Minimum Number of Hops", MNH [82].	Disminuye el enlace más cargado y asignar en primer lugar la longitud de onda ("λ") a las rutas más largas.	Minimiza la probabilidad de bloqueo. Es base de HPLD.	Fijo alternado
5. "Available Wavelengths", AW [81].	Selecciona el camino con mayor número de longitudes de onda disponibles.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
6. "Hop and Available Wavelengths", HAW [81].	Selecciona el camino considerando el número de saltos y las longitudes de onda disponibles.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
7. "Total and Available Wavelengths", TAW [81].	Considera el estado de la red, longitudes de onda disponibles y totales.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
8. "Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths", HTAW [81].	Considera el número de saltos y el estado de la red, y las longitudes de onda disponibles y totales.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
9. "Modified Future Cost", MFC [83].	Emplea una función de coste combinada de distancia y carga de enlace.	Mejora la probabilidad de bloqueo de CDT incorporando equilibrado de carga.	Adaptativo
10. "Least Congested Path Routing", LCPR [79] y [84].	Selecciona el camino de mínima congestión.	Equilibrado de carga.	Adaptativo

11. “Weight Least Congested Path Routing”, WLCPR [85] y [86].	Selecciona el camino de mínima congestión con pesos.	Equilibrado de carga. Admite la consideración de otros criterios.	Adaptativo
12. “Load Balance RWA”, LBRWA [95].	Equilibra la carga de los enlaces mediante función de coste analítica.	Equilibrado de carga.	Adaptativo
13. “Heaviest Path Load Deviation”, HPLD [96].	Emplea una función de coste en función de la carga de los enlaces.	Reencamina los “ <i>lightpaths</i> ” más cargados. Asigna la longitud de onda primero a las rutas más largas.	Adaptativo

Tabla 22: Algoritmos de encaminamiento clásicos válidos para el tiempo real

3.5 Prestaciones de algoritmos clásicos de encaminamiento

Tradicionalmente se han evaluado las prestaciones de red mediante el cómputo de la probabilidad de bloqueo de red; que se estimaba mediante métodos analíticos y de simulación bajo la asunción de una capa física ideal que no cause efectos nocivos sobre una señal transmitida. Estudios de prestaciones clásicos se hallan en las referencias [57][58] y [87].

Mejora en prestaciones de técnicas que realizan equilibrado de carga de red

Los algoritmos LCPR, MFC y HPLD presentados utilizan el algoritmo ASP como motor, incorporando criterios de carga de enlaces a la función de coste. La incorporación de criterios de equilibrado de carga en la algoritmia DRWA ha supuesto un avance fundamental que ha permitido disminuir la probabilidad de bloqueo de peticiones en la red.

Ello le permite alargar la vida de la red, por lo que, la utilización media de los enlaces mediante LCPR, MFC o HPLD es mayor que mediante SP.

Los algoritmos LCPR cualquiera de sus variantes, MFC o HPLD, resuelve el problema DRWA en tareas separadas (R+WA), y por lo tanto tiene menor complejidad computacional que las estrategias conjuntas LLR y MSR, que resuelven ambas tareas de modo conjunto.

Mejora en prestaciones de técnicas con función de coste adaptativa

En la Ilustración 16 se presenta una comparativa de funciones de coste para una topología NSFNET. En este estudio la probabilidad de bloqueo era elevada, y aumentaba considerablemente en situación de red cargada, fundamentalmente por el escaso número de longitudes de onda, (λ), disponibles. Cada fibra dispone de 16 longitudes de onda, sin posibilidad de conversión de longitud de onda, (" λ ").

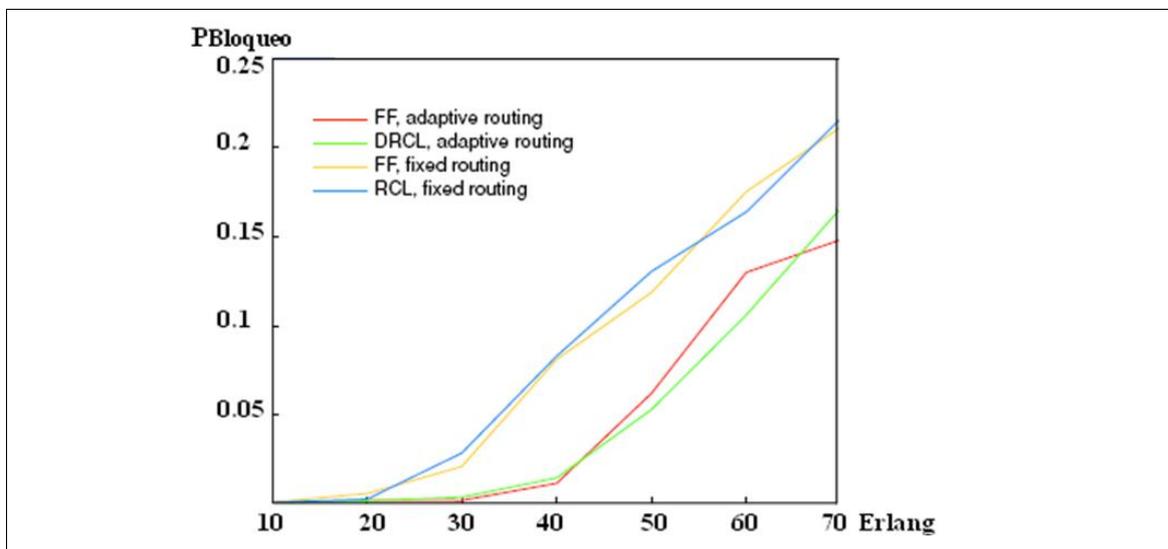


Ilustración 16: Probabilidad de bloqueo encaminamiento fijo vs adaptativo [79]

Puede observarse la diferencia en probabilidad de bloqueo entre estrategias de encaminamiento fijo y adaptativo:

Entre la mejor y peor técnica WA, sea RLC la mejor y FF la peor, la diferencia en probabilidad de bloqueo es de apenas un 0.02. Por lo tanto se puede concluir que el impacto de la técnica WA es menor y menos relevante que el impacto de la técnica R.

Las funciones de coste adaptativas, como AW, HAW, TAW y HTAW, pueden mejorar significativamente el funcionamiento de la red respecto a las funciones de coste fijo como DW, CDT y HW.

3.5.1 Algoritmo SP

Los algoritmos de menor coste, (“*Shortest-Path*”, SP), tienen como objetivo minimizar la probabilidad de bloqueo de conexión, y constituyen la base o punto de partida de la algoritmia heurística de encaminamiento para el problema DRWA.

Se han diseñado una serie de algoritmos SP, como:

- El algoritmo centralizado de Dijkstra, que emplea teoría de grafos. Puede consultarse en la referencia [92].
- El algoritmo de camino de menor coste que puede contener ciclos, propuesto por E. Q. Vieira Martins en la referencia [93].
- El algoritmo Bellman-Ford, descrito en [80]. Debido al enfoque distribuido cada nodo intercambia tablas de encaminamiento con sus nodos vecinos y actualiza su propia tabla de encaminamiento en consonancia.
- El algoritmo de Yen que permite calcular (“k”) caminos más cortos [94].

El algoritmo SP es adecuado para el problema DRWA clásico gracias a la posibilidad de emplear cualquier función de coste por enlace, así como la posibilidad de desarrollarlo bajo enfoques de encaminamiento fijo, fijo-alternado o adaptativo.

Además posee una gran capacidad de adaptación a los nuevos requisitos, como es la inclusión de fenómenos físicos en la algoritmia.

Los algoritmos SP que consideran efectos físicos se tratan en un apartado específico más adelante, como algoritmos de camino de menor coste con restricciones, (“*Constrained Shortest-Path*”, CSP). El algoritmo presentado en este proyecto se clasifica bajo este criterio.

Evolución de la técnica SP hacia funciones de coste adaptativas

Los algoritmos SP han evolucionado en la literatura a partir de técnicas fijas, hacia técnicas fijo-alternadas o adaptativas.

El algoritmo de camino de menor coste fijo (“*Fixed Shortest-Path*”, FSP) aplicado al problema DRWA se utiliza de la siguiente manera [79]:

1. Se calcula un camino como predeterminado para el par origen-destino.
2. Se asigna una longitud de onda disponible, (“ λ ”), a ese camino.
3. Si no hubiera ninguna longitud de onda disponible, (“ λ ”), a lo largo del camino, la petición se bloquea (rechaza).

El algoritmo de camino de menor coste fijo-alternado (“*Fixed-Alternate Shortest – Path*”, FASP) aplicado al problema DRWA, se caracteriza porque se realiza en primer lugar el cómputo de (“*k*”) caminos y posteriormente se comprueba su validez, hasta encontrar un camino viable de acuerdo a criterios de disponibilidad de longitud de onda, (“*λ*”).

El algoritmo FASP requiere de funciones de coste fijas similares a las de la versión FSP. La mejora en prestaciones de FASP es notable a partir de (“*k*”) igual a 3.

Sin embargo, la mejora en prestaciones es mayor mediante el cómputo del camino de menor coste con una función de coste adaptativa, o lo que es lo mismo, el algoritmo (“*Alternate Shortest Path*”, ASP).

Mediante ASP el coste de los enlaces se actualiza al establecer un nuevo “*lightpath*” a la red. Esto permite la incorporación de criterios de carga de los enlaces a su función de coste. La necesidad de equilibrado de carga es un criterio muy relevante en el problema DRWA.

En numerosos estudios se han comparado las técnicas SP en términos de probabilidad de bloqueo, como [79] [80] [82][88][89][90] y [91].

3.5.2 Algoritmo HW

La función de coste basado en saltos (“*Hop-Weight*”, HW) es una estrategia de encaminamiento de tipo “fijo”. Constituye una función lineal, ya que el coste por enlace es igual a “1”. Para mayor información consúltese la referencia [81].

$$w_{ij} = 1, \forall (i, j) \in E.$$

En la Ilustración 17 se presenta el coste total de un camino dependiendo del número de enlaces o saltos que requiera:

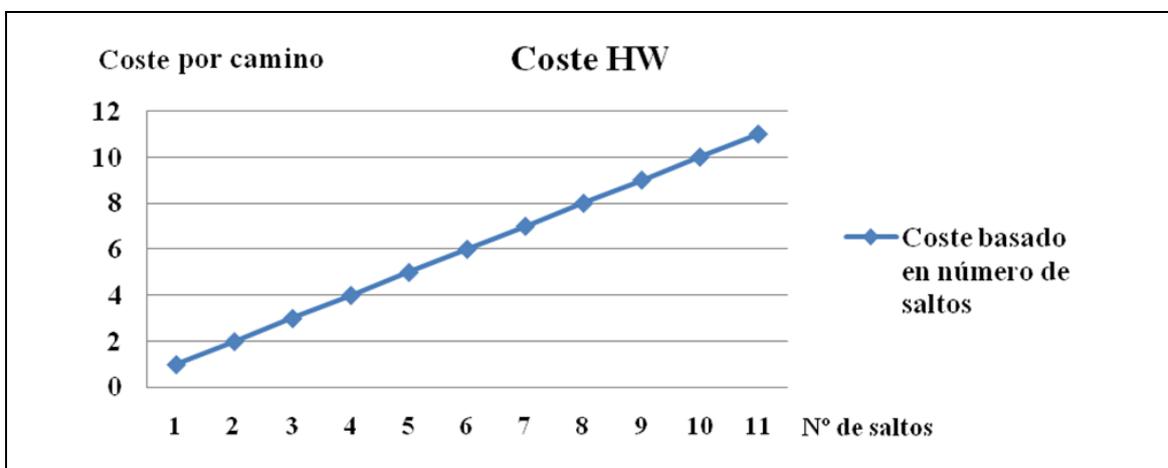


Ilustración 17: Coste de HW

Cuando se aplica el algoritmo SP con función de coste HW todos los enlaces tienen un mismo coste igual a 1. En la Ilustración 18 se representa un ejemplo del funcionamiento de este algoritmo HW en el que se identifica el camino de menor coste en número de saltos entre los nodos 0 y 2.

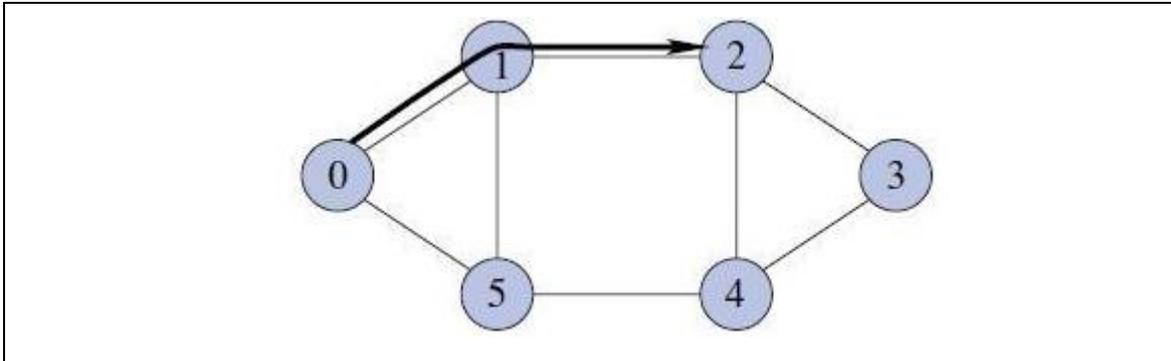


Ilustración 18: Ejemplo de función de coste HW [79]

Intuitivamente, la probabilidad de bloqueo disminuye (considerando bonanza física de todos los caminos ópticos) para un número pequeño de saltos, ya que aumenta la posibilidad de encontrar una longitud de onda disponible, (“ λ ”).

3.5.3 Algoritmo DW

La función de coste basado en distancia (“*Distance-Weight*”, DW) es una estrategia de encaminamiento de tipo fijo. Se calcula el coste por enlace de la siguiente manera [81].

- $w_{ij} = d_{ij}, \forall (i, j) \in E$,
- d_{ij} es la distancia física en microsegundos, (μs).

De la misma manera que MNH, constituye una función de coste lineal. Puede expresarse como un incremento de coste por cada vano de un enlace, como puede observarse en la Ilustración 19:

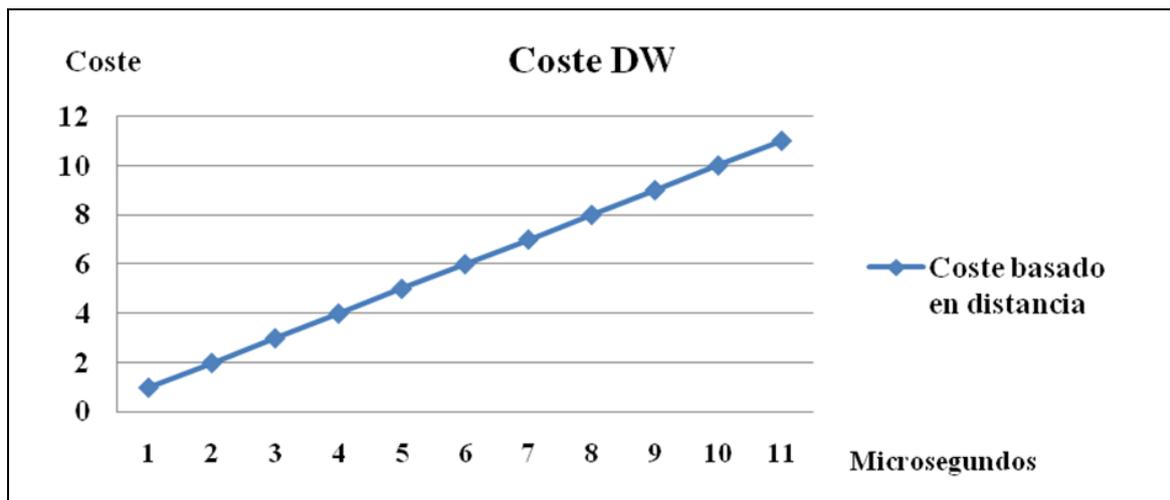


Ilustración 19: Función de coste DW

Esta función de coste resulta en caminos más cortos en distancia con el menor retardo de propagación.

3.5.4 Algoritmo AW

La función de coste basada en longitudes de onda disponibles (“*Available Wavelengths*”, AW) es una función de coste dinámica que cambia con el estado de la red. Se calcula el coste por enlace, de acuerdo a la referencia [81], de la siguiente manera:

Sea:

- E es el conjunto de enlaces (i, j) de la red.
- λ_{ij}^a es el número de longitudes de onda disponibles en el enlace (i, j) .
- λ_{ij}^T es el número de longitudes de onda totales en el enlace (i, j) .

La función de coste es la siguiente:

$$w_{ij} = \begin{cases} -\log\left(1 - \frac{1}{\lambda_{ij}^a}\right) & \lambda_{ij}^a > 1, \forall (i, j) \in E \\ 1 & \lambda_{ij}^a \leq 1, \forall (i, j) \in E \end{cases}$$

En la Ilustración 20 puede observarse la forma exponencial decreciente de la función de coste AW, que penaliza notablemente la carga de los enlaces. Un enlace “lleno” tiene coste igual a 1.

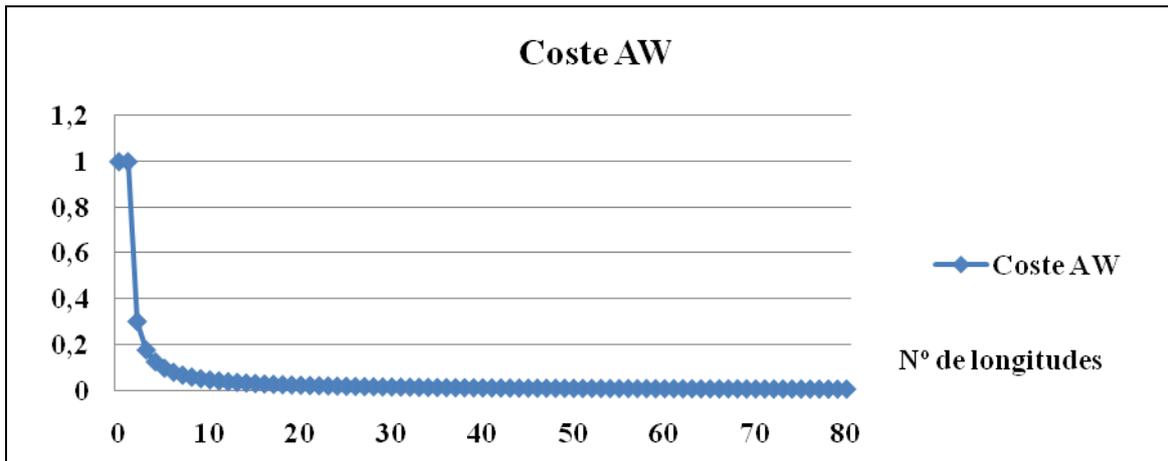


Ilustración 20: Coste de AW

3.5.5 Algoritmo HAW

La función de coste basado en cuenta de saltos y longitudes de onda disponibles (“*Hop count and Available Wavelengths*”, HAW) es una función de coste dinámica que cambia con el estado de la red. Se calcula el coste por enlace de la siguiente manera [81]:

Sea:

- α, β son pesos asociados al número de saltos y longitudes de onda disponibles, respectivamente.

En la función de coste presentada el parámetro número de saltos tiene mayor peso.

$$w_{ij} = \begin{cases} \alpha - \beta \log \left(1 - \frac{1}{\lambda_{ij}^a} \right) & \lambda_{ij}^a > 1, \forall (i, j) \in E, \alpha, \beta > 0 \\ \alpha + \beta & \lambda_{ij}^a \leq 1, \forall (i, j) \in E, \alpha, \beta > 0 \end{cases}$$

3.5.6 Algoritmo TAW

La función de coste basado en longitudes de onda totales y longitudes de onda disponibles (“*Total Wavelengths and Available Wavelengths*”, TAW) es una función de coste dinámica que constituye una evolución del coste AW. En forma matemática puede expresarse el coste por enlace de la siguiente manera:

$$w_{ij} = \begin{cases} -\log \left(1 - \left(1 - \frac{\lambda_{ij}^a}{\lambda_{ij}^T} \right)^{\lambda_{ij}^a} \right) & \lambda_{ij}^a < \lambda_{ij}^T, \forall (i, j) \in E \\ 1 & \lambda_{ij}^a = \lambda_{ij}^T, \forall (i, j) \in E \end{cases}$$

3.5.7 Algoritmo HTAW

La función de coste basado en cuenta de saltos, longitudes de onda totales y longitudes de onda disponibles (*“Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths”*, HTAW) es una función de coste dinámica que cambia con el estado de la red. Se calcula el coste por enlace de la siguiente manera [81]:

Sea:

- α, β son pesos asociados a la cuenta de saltos y TAW, respectivamente.

$$w_{ij} = \begin{cases} \alpha - \beta \log \left(1 - \left(1 - \frac{\lambda_{ij}^a}{\lambda_{ij}^T} \right)^{\lambda_{ij}^a} \right) & \lambda_{ij}^a < \lambda_{ij}^T, \forall (i, j) \in E, \alpha, \beta > 0 \\ \alpha + \beta & \lambda_{ij}^a = \lambda_{ij}^T, \forall (i, j) \in E, \alpha, \beta > 0 \end{cases}$$

3.5.8 Algoritmo LCPR

El algoritmo de encaminamiento de mínima congestión (*“Least Congested Path Routing”*, LCPR) es un algoritmo adaptativo cuyo objetivo es evitar sobrecarga de enlaces. Una versión clásica selecciona el camino de menos congestión para establecer una petición a través del mismo. Para mayor detalle consúltese en las referencias [79] y [84].

Es posible la inclusión de criterios de coste adicionales en el algoritmo LCPR, pasando a ser el algoritmo de mínima congestión con pesos (*“Weight Least Congested Path Routing”*, WLCPR). Se describe en las referencias [85] y [86].

Otro algoritmo de mínima congestión es el de (*“k”*) caminos propuesto por S. Siddiqui en [108]. Es un algoritmo adaptativo que tiene como coste de enlace el cociente entre las longitudes de onda ocupadas y el número total de longitudes de onda. Si no hubiera ninguna longitud de onda disponible, (*“λ”*), el coste del enlace es infinito.

Sea:

- (λ_t) es la capacidad total del enlace.
- (λ_a) es el número de longitudes de onda desocupadas en cada enlace (*“l”*) del camino (*“p”*).

$$\sum_{l \in p} (\lambda_t - \lambda_a) / \lambda_t$$

3.5.9 Algoritmo LBRWA

El algoritmo de equilibrado de carga (*“Load Balance RWA”*, LBRWA) es una propuesta DRWA que aplica a la tarea de encaminamiento. Este algoritmo equilibra la carga de

los enlaces de la red. Mediante un modelo analítico se calcula dinámicamente el coste de los enlaces.

En el algoritmo LBRWA se seleccionan caminos más largos y menos congestionados. LBRWA mejora la probabilidad de bloqueo de red, siempre y cuando sea posible la conversión de longitud de onda, (“ λ ”), a lo largo de los caminos. Para mayor detalle y formulación, consúltese [95].

3.5.10 Algoritmo HPLD

El algoritmo de desviación del camino más cargado (“*Heaviest Path Load Deviation*”, HPLD) tiene como objetivo reencaminar algunos “*lightpaths*” que pasan a través del enlace más cargado, de forma que el número máximo de longitudes de onda utilizadas se reduce.

HPLD no es válido para tiempo real tal y como se define, ya que requiere conocer de antemano la totalidad de la demanda. Sin embargo, se ha considerado conveniente incluir este algoritmo como técnica de encaminamiento, puesto que incorpora la idea de reencaminar el tráfico ya establecido, junto a la descongestión de enlaces críticos más cargados. Formulación asociada se encuentra en la referencia [96].

3.5.11 Algoritmo MFC

Un ejemplo de algoritmo basado en “*Shortest-Path*” que emplea una función de coste adaptativa es (“*Modified Future Cost*”, MFC). Se describe en la referencia [54].

La función de coste para MFC es una combinación de criterios de distancia y carga de enlace; es decir, el número de longitudes de onda disponibles en el enlace. Cada longitud de onda disponible, (“ λ_A ”), tiene un valor igual a 1 y cada longitud de onda ocupada, (“ λ_{NA} ”), tiene un valor igual a 0. De esta forma, cuantas más longitudes de ondas disponibles tenga el enlace (menor carga) menor será su coste, siempre ponderado por un factor que es la distancia del enlace.

Sea:

- $\lambda(j)_{i,k}$ es la longitud de onda (“j”), en el enlace (i-k).

$$MFC(l_{i,k}) = \frac{d_{i,k}}{\sum_{j=1}^N \lambda(j)_{i,k}^{-1}}$$

3.6 Clasificación de algoritmos clásicos de asignación de longitud de onda

La tarea de asignación de longitud de onda, WA, puede realizarse de forma paralela a la tarea de encaminamiento, R, o bien simultáneamente a esta tarea.

En este apartado se presentan técnicas clásicas de asignación de longitud de onda, WA. Los algoritmos WA clásicos consideran la transmisión a través de un medio físico ideal.

Para la realización de la tarea WA el conjunto de longitudes de onda disponibles (no asignadas) se ordena, en general, bajo alguna política. También puede adoptarse un criterio de no ordenación. Las principales estrategias WA incluyen criterios como:

- Ordenar las longitudes de onda por el instante en que se usaron por última vez (“Round-Robin”, RR).
- Elección aleatoria; es decir, no se ordenan las longitudes de onda, (“ λ s”).
- Expandir o contraer en el espectro las longitudes de onda utilizadas a través de los enlaces.

La conveniencia de un algoritmo de WA respecto a otro depende de factores como:

- La topología de la red (redes en anillo frente a redes malladas, con mayor o menor grado de conectividad).
- La carga de la red (relación entre las longitudes de onda utilizadas frente a las disponibles).
- El objetivo deseado: retardo máximo requerido, recursos de red disponibles, probabilidad de bloqueo máxima impuesta, equilibrio entre retardo computacional y prestaciones.

En la Tabla 23 se presentan algoritmos clásicos de asignación de longitud de onda, WA:

Algoritmo	Estrategia	Objetivo
1. “Random”, R [79][84]	Selección aleatoria	Minimiza la probabilidad de bloqueo.
2. “First-Fit”, FF [79][84]	Selección de la primera longitud de onda disponible	Minimiza la probabilidad de bloqueo.
3. “Least-Used o Spread”, LU [79][84]	Selección de la longitud de onda menos utilizada de la red.	Extiende el espectro ocupado. Realiza equilibrado de carga.
4. “Most-Used”, MU o Pack	Selección de la longitud de onda más utilizada	Concentra el espectro ocupado. Minimiza la probabilidad de

[79][84][97]		bloqueo.
5. “Min-Product”, MP [98]	Selecciona la longitud de onda que minimiza el productorio del número de fibras en las que dicha longitud de onda ya está asignada en un enlace, para todos los enlaces que constituyen la ruta seleccionada.	Se aplica en redes multifibra. Equilibra la carga. Minimiza la probabilidad de bloqueo.
6. “Least-Loaded”, LL [99]	Sobre el enlace más cargado de la ruta, selecciona la longitud de onda con mayor número de unidades disponibles.	Se aplica en redes multifibra. Descongestiona el enlace más cargado. Minimiza la probabilidad de bloqueo.
7. “Min-Sum”, MS [79][100]	Diseñado para redes multifibra. Minimiza el sumatorio de las tasas de utilización de una longitud de onda respecto al total de longitudes de onda, para todos los enlaces que constituyen la ruta seleccionada.	Se aplica en redes multifibra. Equilibra la carga, por lo que minimiza el número de fibras de la red. Minimiza la probabilidad de bloqueo.
8. “Max-Sum”, $M\Sigma$ [79][97][98][100]	Selecciona la longitud de onda que minimiza la pérdida de capacidad total de los caminos.	Optimiza la capacidad de los enlaces tras la reserva de recursos en la nueva conexión. Minimiza la probabilidad de bloqueo.
9. “Relative Capacity Loss”, RCL [79][101]	Selecciona la longitud de onda que minimiza la pérdida de capacidad relativa de los caminos.	Optimiza la capacidad relativa de los enlaces tras la reserva de recursos en la nueva conexión. Minimiza la probabilidad de bloqueo.
10. “Wavelength Reservation”, Rsv [88]	Reserva de longitudes de onda en los enlaces para conexiones multisalto con pares origen-destino concretos, de forma que no puedan utilizarse para otros pares origen-destino incluso estando desocupadas.	Minimiza la probabilidad de bloqueo en conexiones multisalto, mientras que aumenta la probabilidad de bloqueo en conexiones monosalto. Requieren la combinación con otra técnica WA.
11. “Threshold Protection”, Thr [88]	Solamente se seleccionan longitudes de onda a peticiones monosalto, si la capacidad de los enlaces que constituyen la ruta supera un cierto umbral.	Minimiza la probabilidad de bloqueo en conexiones multisalto, mientras que aumenta la probabilidad de bloqueo en conexiones monosalto.

		Requieren la combinación con otra técnica WA.
12. “Distributed Relative Capacity Loss”, DRCL [79]	RCL de enfoque distribuido. Los nodos intercambian entre sí tablas RCL a partir de las cuales se selecciona la longitud de onda.	Enfoque distribuido. Minimiza la probabilidad de bloqueo.

Tabla 23: Técnicas clásicas de asignación de longitud de onda para redes monofibra

Por el uso de información de estado de la red distinguimos entre dos tipos de técnicas:

- Estáticas (Tabla 23. Algoritmos (1-2)): los algoritmos estáticos no tienen en cuenta la carga de los enlaces.
- Dinámicas (Tabla 23. Algoritmos (3-12)): las técnicas dinámicas discriminan la longitud de onda, (“ λ ”), a seleccionar en función de la carga.

Por el número de fibras por enlace consideradas en los distintos algoritmos distinguimos entre:

- Monofibra (Tabla 23. Algoritmos (1-4)): una sola fibra en el enlace que proporciona conectividad entre dos nodos.
- Multifibra. (Tabla 23. Algoritmos (5-12)): cuando la red tiene múltiples fibras en los enlaces, el nivel de utilización de cada longitud de onda, (“ λ ”), se emplea para determinar la carga de los mismos. También se pueden usar para seleccionar la longitud de onda, (“ λ ”), en función de la carga a través de un camino computado mediante un algoritmo de encaminamiento, como SP.

El objetivo de los algoritmos en el WA es:

- Reducir la probabilidad de bloqueo global de la red (Tabla 23. Algoritmos (1-9)).
- Reducir la probabilidad de bloqueo de conexiones origen-destino de más de un salto (Tabla 23. Algoritmos (10-11)).

Las técnicas LU, MU, MP, LL, $M\sum$ y RCL requieren una visión global del estado de la red. La información de estado de la red debe ser actualizada frecuentemente para asegurar la precisión de cálculos, de forma similar a un encaminamiento en función del estado de enlace.

3.7 Prestaciones de algoritmos clásicos de asignación de longitud de onda

En el trabajo de A. Birman y A. Kershenbaum [88] se comparan distintas técnicas de asignación de longitud de onda, (“ λ ”): aleatoriamente o la primera longitud disponible, en sentido ascendente o descendente. Se analiza el comportamiento de la red al establecer adicionalmente caminos de protección dedicada. Se realizan simulaciones para un total de 6 a 8 longitudes de onda disponibles, por lo que los resultados cuantitativos ya no son relevantes actualmente, disponiendo de 80 o 160 longitudes de onda por fibra.

Las técnicas Rsv y Thr combinadas con otras técnicas WA consiguen reducir la probabilidad de bloqueo en conexiones multisalto. Permiten un mejor funcionamiento de la red, a pesar de que la probabilidad de bloqueo global pudiera ser mayor.

En la Tabla 24 se presenta una ordenación cualitativa de las prestaciones de las técnicas de asignación de longitud de onda, (“ λ ”), presentadas:

Algoritmo	Capacidad de optimización	Uso combinado	Numero de fibras por enlace	Enfoque
LU	$LU < R$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
R	$LU < R < MP$	No requiere	Monofibra	Centralizado
MP	$R < MP < FF$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
FF	$MP < FF < MU$	No requiere	Monofibra	Centralizado
MU	$FF < MU < LL$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
LL	$MU < LL < M\Sigma$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
$M\Sigma$	$LL < M\Sigma < RCL$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
RCL	$M\Sigma < RCL$	No requiere	Monofibra y multifibra	Centralizado
DRCL	$M\Sigma < DRCL$	No requiere	Monofibra y multifibra	Distribuido
Rsv	Prioriza conexiones de interés	Requiere	Monofibra y multifibra	Distribuido
Thr	Introduce la utilización de umbrales de tasa de uso	Requiere	Monofibra y multifibra	Distribuido

Tabla 24: Prestaciones de las técnicas de asignación de longitud de onda

En la Ilustración 21 se presenta una comparativa de la probabilidad de bloqueo de distintas estrategias de asignación de longitud de onda, (“ λ ”). Pueden observarse mejores prestaciones para los algoritmos RLC a partir de cierto nivel de carga de red 50 o 60 (Erlang).

Otra conclusión destacable de estas gráficas es la observación de cómo disminuye considerablemente la probabilidad de bloqueo, al aumentar el número de fibras según las técnicas presentadas, aunque el número de longitudes de onda total disponibles sea la misma. Para bajos niveles de carga de red se obtienen muy buenos resultados con la técnica MU.

Siguiendo con la Ilustración 21, sea:

- (“M”) es el número de fibras.
- (“W”) es el número de longitudes de onda por fibra.

En la literatura clásica se consideró el problema RWA sujeto a la restricción de continuidad de longitud de onda, (“ λ ”). Se exploró la capacidad de red para 2, 4, 8 y 16 longitudes de onda disponibles por fibra. Bajo estas circunstancias, el número de longitudes de onda disponibles era un efecto muy limitante, por lo tanto la restricción de continuidad suponía una dificultad añadida al problema.

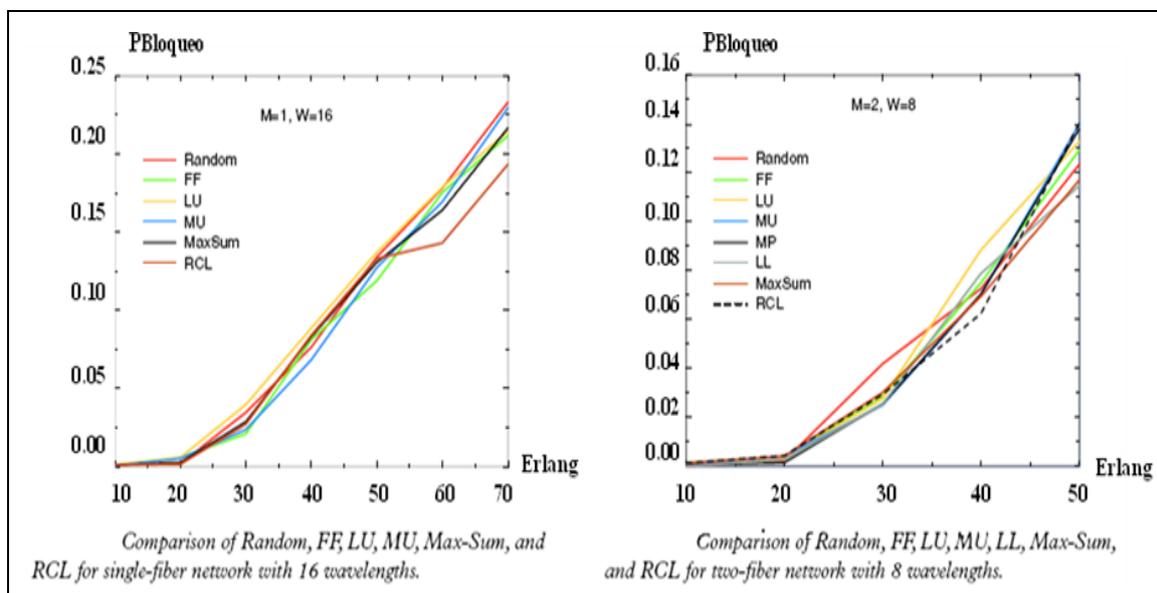


Ilustración 21: Probabilidad de bloqueo de técnicas WA [79]

Al aumentar el número de longitudes de onda disponibles, (comúnmente hoy día se dispone de 80 longitudes de onda en cada nodo), se favorece la capacidad de red. Adicionalmente, el balanceado de carga, que puede interpretarse como la tasa de utilización de longitudes de onda suponiendo tráficos iguales por cada una de ellas, permite un mejor aprovechamiento de las longitudes de onda disponibles.

Hoy día el impacto de la limitación en longitudes de onda disponibles es un efecto poco restrictivo, perdiendo protagonismo la tarea WA respecto a la del encaminamiento R.

3.7.1 Algoritmo R

La técnica WA aleatoria (“*Random*”, R) es una técnica estática ya que no utiliza información de la carga de los enlaces. Puede consultarse detalladamente en las referencias [79] y [84]. Funciona de la siguiente manera:

- Se busca en el conjunto total de longitudes de onda, para comprobar cuales están disponibles a lo largo del conjunto de enlaces a través de los cuales se desea establecer un camino óptico desde el nodo origen “s” al nodo destino “d”.
- Posteriormente, de entre las longitudes de onda disponibles selecciona una de ellas aleatoriamente, normalmente con distribución de probabilidad uniforme.

Prestaciones:

- Esta técnica tiene un alto coste computacional al tener que comprobar la disponibilidad de todas las longitudes de onda.
- No introduce ningún (“*overhead*”) en la comunicación puesto que no se requiere de información global.

3.7.2 Algoritmo FF

De la misma forma que R (“*First-Fit*”, FF) es una técnica estática. Puede consultarse detalladamente en las referencias [79] y [84]. Funciona del siguiente modo:

- Se numeran las longitudes de onda.
- Cuando se requiere de una longitud de onda, (“ λ ”), a lo largo de un conjunto de enlaces que forman un camino, se comprueba la disponibilidad de las longitudes de onda empezando por la de menor numeración hasta encontrar una longitud de onda disponible, (“ λ_A ”). Se selecciona dicha longitud de onda, (“ λ ”).

Prestaciones:

- Tiene un coste computacional inferior que R, sobre todo cuando la red está poco cargada, ya que sólo se tendrá que comprobar la disponibilidad de un pequeño conjunto de longitudes de onda hasta encontrar la primera de ellas disponible.
- De la misma forma que R, esta técnica no introduce sobrecarga “*overhead*”.

3.7.3 Algoritmo LU

La técnica WA que selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), menos utilizada (“*Least-Used*”, LU) también se conoce como SPREAD porque tiende a utilizar uniformemente todas las longitudes de onda en lugar de sobrecargar una sola de ellas [79][84]. El procedimiento es el siguiente:

- Se numeran las longitudes de onda.
- Se selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), menos utilizada en la red, de forma que equilibra la carga entre las distintas longitudes de onda. En caso de empate selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), de menor numeración.

Prestaciones:

- El algoritmo LU puede funcionar bien para pares origen-destino monosalto. Para conexiones que requieren un mayor número de saltos, es más probable que la longitud de onda, (“ λ ”), menos utilizada de la red esté por el contrario utilizada en algún enlace de dicho camino, y por lo tanto no sea posible cumplir la restricción de continuidad para la nueva petición. Este método tiene una alta probabilidad de bloqueo, ya que en dicho caso, la petición se pierde.
- Las prestaciones de LU son peores que las de R como veremos en la comparativa más adelante. Además requiere información del estado de la red, y por lo tanto supone una sobrecarga.

3.7.4 Algoritmo MU

La selección de la longitud de onda, (“ λ ”), más utilizada (“*Most-Used*”, MU) o PACK fue propuesta por S. Subramaniam y R.A. Barry [97]. Supone el criterio contrario al algoritmo LU y disminuye la probabilidad de bloqueo respecto a éste.

Se apilan las conexiones en pocas longitudes de onda conservando la capacidad esparcida de las longitudes de onda menos utilizadas.

Prestaciones:

- Esta técnica ofrece mejores prestaciones en cuanto a probabilidad de bloqueo que LU y que FF. El coste en computación, almacenamiento y sobrecarga por información del estado de la red es también similar al de LU.

3.7.5 Algoritmo MP

La selección de longitud de onda, (“ λ ”), mediante la técnica de mínimo producto, (“*Min-Product*”, MP), es una técnica para redes multifibra propuesto por G. Jeong y E. Ayanoglu [98].

Sea:

- (“ M_l ”) es el número de fibras en el enlace (“ l ”).
- (“ D_{lj} ”) es el número de fibras para las cuales la longitud de onda (“ λ_j ”) está utilizada en el enlace.
- (“ W ”) es el número de longitudes de onda por fibra.

Se selecciona la longitud de onda que minimiza el productorio de (“ D_{lj} ”) para una longitud de onda (“ λ_j ”), $1 \leq j \leq W$.

$$\prod_{l \in \pi(p)} D_{lj}$$

Prestaciones:

- Empaqueta longitudes de onda en fibras, por lo tanto minimiza el número de fibras de la red. En presencia de una sola fibra equivale a FF.

3.7.6 Algoritmo LL

Al igual que LL, la técnica que selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), Menos-Cargada (“*Least-Loaded*”, LL) está diseñada para redes multifibra, lo describen R. A. Barry y S. Subramaniam [97].

Sea:

- (“ M_l ”) es el número de fibras en el enlace (“ l ”).
- (“ A_{lj} ”) es el número de fibras en las que la longitud de onda (“ λ_j ”) está utilizada en el enlace (“ l ”).
- (“ S_p ”) es el conjunto de longitudes de onda disponibles en todo el camino (“ p ”).

Se selecciona la longitud de onda (“ λ_j ”), que minimiza a lo largo del camino (“ p ”), la suma de las tasas de uso de las fibras de los enlaces. Así, selecciona la longitud de onda de menor utilización media. En el caso de haber varias longitudes de onda que cumplan esta condición, selecciona la de menor índice.

$$\min_{j \in S_p} \sum_{l \in p} \frac{A_{lj}}{M_l}$$

Prestaciones:

- Selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), de menor utilización media. Se reduce a FF en redes monofibra.

3.7.7 Algoritmo MS

La técnica de mínima suma, (“*Min-Sum*”, MS), selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), con mayor capacidad residual en el enlace más cargado del camino [79][100].

Sea:

- (“ M_l ”) es el número de fibras en el enlace (“ l ”).
- (“ D_{lj} ”) es el número de fibras para las cuales la longitud de onda (“ λ_j ”) está utilizada en el enlace.
- (“ S_p ”) es el conjunto de longitudes de onda disponibles en todo el camino (“ p ”).

1. En primer lugar, selecciona el enlace más cargado:

$$\min_{l \in \pi(p)} (M_l - D_{lj})$$

2. La longitud de onda seleccionada, (“ λ ”), debe tener mayor capacidad residual en el enlace más cargado. En caso de empate, selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), de menor índice:

$$\max_{j \in S_p} \min_{l \in \pi(p)} (M_l - D_{lj})$$

Prestaciones:

- Se reduce a FF en redes monofibra.
- Maximiza la capacidad residual en el enlace más cargado.

3.7.8 Algoritmo $M\Sigma$

El algoritmo WA de máxima suma, (“*Max-Sum*”, $M\Sigma$) fue diseñado para redes multifibra pero también puede aplicarse a redes monofibra [79][97][98] y [100].

Se combina con una estrategia de encaminamiento fijo y en principio es una técnica aplicable para planificación de red más que para tiempo real ya que requiere conocer la totalidad de la demanda.

Sea:

- (“ $\Psi'(j)$ ”) el siguiente estado de red para una longitud de onda, (“ λ_j ”).
- $R(\Psi'(j), p)$ la capacidad del camino (“ p ”) en el siguiente estado de red tras asignar la longitud de onda, (“ λ_j ”).

En cada iteración del algoritmo, éste selecciona la longitud de onda (“ λ_j ”) que maximiza suma de la capacidad de los caminos (“ p ”) en el siguiente estado de red.

$$\sum_{p \in P} R(\Psi'(j), p),$$

Se define como capacidad de un camino $R(\Psi, p)$ a la suma, para cualquier longitud de onda asignada, (“ λ_j ”), del número de longitudes de onda disponibles, (“ λ_A ”), en el enlace más cargado de dicho camino. El enlace más cargado es aquel con menor número de longitudes de onda disponibles.

$$R(\Psi, p) = \sum_{j=1}^{\max} \min_{l \in \pi(p)} c(\Psi, l, j).$$

Visto de otra manera, el algoritmo $M\Sigma$ selecciona la longitud de onda (“ λ_j ”) que minimiza la pérdida de capacidad de los caminos. Este concepto es la base del algoritmo RLC que veremos en el siguiente apartado.

$$\sum_{p \in P} (R(\Psi'(j)) - (R(\Psi'(j), p)))$$

Tras establecer un “*lightpath*” con una longitud de onda (“ λ_j ”) solamente cambia la capacidad respecto a esta longitud de onda (“ λ_j ”) (se recuerda que el algoritmo está presvisto para enlaces multifibra). Por lo tanto es suficiente con que el algoritmo $M\Sigma$ minimice la pérdida de capacidad para dicha longitud de onda (“ λ_j ”).

$$\sum_{p \in P} (r(\Psi'(j)) - (r(\Psi'(j), p)))$$

3.7.9 Algoritmo RLC

La técnica WA de Pérdida de Capacidad Relativa, (“*Relative Capacity Loss*”, RCL), propuesta por X. Zhang y C. Quiao, está basada en $M\Sigma$. Para proporcionar una solución al problema DRWA, se combina con una estrategia de encaminamiento fijo, y en

principio es una técnica aplicable para planificación de red más que para tiempo real. Para mayor información consúltese referencias [79] y [101].

$M\Sigma$ selecciona la longitud de onda, (“ λ ”), que minimiza la pérdida de capacidad de todos los “*lightpaths*” de la red por lo que se requiere conocer la totalidad de la demanda. No obstante, seleccionar la longitud de onda, (“ λ ”), que minimiza la pérdida de capacidad total no siempre es la mejor elección.

El funcionamiento es el siguiente:

Supongamos la necesidad de selección entre dos longitudes de onda (“ λ_i ”) y (“ λ_j ”). Consideremos los “*lightpaths*” (“ p_1 ”), (“ p_2 ”) y (“ p_3 ”).

Supongamos también que la longitud de onda (“ λ_i ”) minimiza la pérdida de capacidad de los “*lightpaths*”, pero bloquea (“ p_1 ”). Sin embargo, la longitud de onda (“ λ_j ”) produce mayor pérdida de capacidad de los “*lightpaths*” pero no los bloquea. En ese caso, es conveniente que la longitud de onda (“ λ_j ”) sea seleccionada. Bajo este criterio se realiza el algoritmo RLC.

El objetivo del algoritmo RLC es minimizar la pérdida de capacidad relativa de todos los “*lightpaths*” de la red. Se calcula, siguiendo con la nomenclatura anterior, como:

$$\sum_{p \in P} (R(\psi'(j) - (r(\psi'(j), p)))/r(\psi, p, j))$$

Esta ecuación representa en el numerador la pérdida de capacidad del camino si se asigna una determinada longitud de onda (“ λ_j ”), que se divide entre la capacidad del camino para (“ λ_j ”).

Recordemos que se conoce la capacidad de un camino (“ p ”) para la longitud de onda (“ λ_j ”) como el número fibras en las que (“ λ_j ”) está disponible en el enlace más cargado del camino. RLC selecciona la longitud de onda (“ λ_j ”) que minimiza la suma de las pérdidas de capacidad relativa de todos los caminos establecidos.

Ambos algoritmos $M\Sigma$ y RLC pueden utilizarse para tráfico no uniforme añadiendo pesos a la pérdida de capacidad.

Prestaciones:

- En general RLC obtiene mejores resultados que $M\Sigma$.

3.7.10 Algoritmo DRLC

El algoritmo (“*Distributed Relative Capacity Loss*”, DRLC), propuesto por H. Zang en [79], es una versión del algoritmo RLC bajo enfoque distribuido

Para acelerar el proceso de asignación de longitud de onda, cada nodo de la red almacena información de la pérdida de capacidad de cada longitud de onda, de forma que sólo se requiere de una “*Tabla de Lookup*” y pequeños cálculos cuando se produce la llegada de una petición. El algoritmo se combina en la literatura con un encaminamiento mediante la técnica de camino de menor coste distribuido Bellman-Ford.

3.7.11 Algoritmo Rsv

Tanto el algoritmo de Reserva de Longitud de Onda, (“*Wavelength Reservation*”, Rsv), como el de Protección de Umbral (“*Protecting Threshold*”, Thr), se describen en la referencia [81].

Estas técnicas difieren de cualquier otra técnica WA en los siguientes aspectos:

- No especifican qué longitud de onda elegir, lo que especifican es si una longitud de onda es viable o no para asignarse a una petición de tráfico en función del estado actual de la red, por lo tanto no pueden funcionar solos. Requieren su combinación con otra técnica de asignación de longitud de onda, WA, como las descritas anteriormente.
- En el algoritmo Rsv se reserva una longitud de onda, (“ λ ”), en un enlace especificado para un determinado flujo o petición.

Por ejemplo, la longitud de onda (“ λ_1 ”) en el enlace (1,2) puede reservarse sólo para conexiones desde el nodo 0 al nodo 3. Así, una petición de conexión desde el nodo 1 al 3 no podría tomar esta longitud de onda en el enlace (1,2), incluso si se encontrara desocupada.

Prestaciones:

- Frente a otros algoritmos cuya tendencia es minimizar la probabilidad de bloqueo de todas las peticiones de conexión, Rsv y Thr pretenden proteger solamente las conexiones que atraviesan múltiples enlaces o conexiones multisalto.
- Por lo tanto permite un mejor funcionamiento de la red, a pesar de que la probabilidad de bloqueo global pudiera ser mayor.

3.7.12 Algoritmo Thr

En Thr solamente se asigna una longitud de onda (“ λ ”) a una conexión monosalto, si la capacidad de los enlaces que componen el camino asociado a la petición supera un cierto umbral de peticiones desocupadas. Puede consultarse en la referencia [81].

Prestaciones:

- Consigue reducir la probabilidad de bloqueo en conexiones multisalto, mientras que aumenta la probabilidad de bloqueo de conexiones monosalto.
- Por lo tanto permite un mejor funcionamiento de la red, a pesar de que la probabilidad de bloqueo global pudiera ser mayor.

3.8 Algoritmos conjuntos de encaminamiento y asignación de longitud de onda

Es posible resolver el problema DRWA conjuntamente en las tareas de encaminamiento, R, y asignación de longitud de onda, WA. Este tipo de resolución permite alcanzar mayores prestaciones de red al realizar asignaciones más cercanas al movimiento óptimo.

En la Tabla 25 se describen algunas estrategias conjuntas heurísticas representativas:

Algoritmo	Estrategia	Objetivo
<i>Joint Wavelength-Route Selection</i> , JWRS [84]	Minimiza la función de coste considerando la tasa de uso de longitudes de onda, número de saltos y congestión.	Optimiza la capacidad de red. Mínimiza la probabilidad de bloqueo.
<i>Least Loaded Routing</i> , LLR [99]	Mide la congestión de cada enlace de los “ <i>k</i> -caminos” más cortos y selecciona la ruta con menos enlaces congestionados.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.
<i>Minimum Sum Routing</i> , MSR [99]	Se selecciona un camino con la mínima suma de la congestión de los enlaces.	Minimiza la probabilidad de bloqueo.

Tabla 25: Selección de técnicas conjuntas DRWA

3.8.1 Algoritmo MSR

El algoritmo adaptativo (“*Minimum Sum Routing*”, MSR) es un algoritmo aplicado en redes multifibra. Selecciona conjuntamente la ruta lógica (“*p*”) y la longitud de onda (“ λ_j ”). Es un algoritmo que evita la congestión de red. De esta manera se afronta el objetivo de esta técnica que es minimizar la probabilidad de bloqueo [99].

Para cada camino más corto de los (“*k*”) propuestos en MSR se selecciona (asumiendo restricción de longitud de onda):

1. El camino (“p”) y longitud de onda (“λ_j”) que minimizan el sumatorio de las tasas de ocupación de una longitud de onda (fibras en las que esa longitud de onda (“λ”) está ocupada respecto a fibras totales en el enlace) a lo largo de los enlaces del camino propuesto (“p”).
2. Se selecciona la longitud de onda (“λ”) que tiene la mínima utilización media.

Sea:

- M_l el número de fibras total en el enlace (“l”).
- A_{ij} el número de fibras para las cuales la longitud de onda (“λ_j”) se utiliza en el enlace (“l”).
- S_p es el conjunto de longitudes de onda disponibles a lo largo del camino (“p”).

$$\min_{j \in S_p} \sum_{l \in p} \frac{A_{lj}}{M_l}$$

Prestaciones:

- La técnica de asignación de longitud de onda se reduce a la técnica MU en enlaces monofibra.

3.8.2 Algoritmo LLR

El algoritmo adaptativo (“*Least Loaded Routing*”, LLR) descrito en [99] es un algoritmo aplicado en redes multifibra, que selecciona conjuntamente una ruta lógica, (“p”) y una longitud de onda (“λ_j”).

Sea:

- M_l el número de fibras total en el enlace, (“l”).
- A_{ij} el número de fibras para las cuales la longitud de onda (“λ_j”), se utiliza en el enlace (“l”).
- S_p es el conjunto de longitudes de onda disponibles a lo largo del camino (“p”).

$$\max_{j \in S_p} \min_{l \in p} [M_l - A_{lj}]$$

Se selecciona la longitud de onda (“λ_j”), que tiene mayor capacidad residual en el enlace más cargado del camino (“p”).

Prestaciones:

- Es un algoritmo que evita la congestión de red. De esta manera se afronta el objetivo de esta técnica que es minimizar la probabilidad de bloqueo.

- La técnica de asignación de longitud de onda de LLR se reduce a la técnica MU en enlaces monofibra. Esta técnica mejora las prestaciones de MSR.

3.9 El problema PLI-DRWA

El problema DRWA clásico presenta ciertas limitaciones para su buen funcionamiento en entornos de red reales (no emulados). Esto se debe al impacto en transmisión de los efectos físicos que producen una pérdida de calidad de señal en transmisión y en consecuencia limitan el alcance sin regeneración.

La nueva tendencia consiste en la consideración de los efectos de la capa física en el problema DRWA, lo que se conoce como problema (*“Physical Layer Impairment - Dynamic Routing and Wavelength Assignment”*, PLI-DRWA).

La implementación de algoritmos PLI-DRWA es hoy día una necesidad para el adecuado funcionamiento en tiempo real de una red WSON – DWDM.

Como muestra la Tabla 26 hay dos tipos de estrategias PLI-DRWA:

Estrategias PLI-DRWA	Descripción
<i>“Physical Layer Impairment Constraint DRWA”</i> , PLIC-DRWA.	La estrategia PLIC-DRWA consiste en considerar los fenómenos físicos como restricciones a cumplir antes de asignarle un camino óptico y una longitud de onda a una petición entrante. La ruta asignada debe cumplir las restricciones, estableciéndose un control de admisión.
<i>“Physical Layer Impairment Aware DRWA”</i> , PLIA-DRWA.	La estrategia PLIA-DRWA consiste en realizar las selecciones de camino óptico y longitud de onda considerando los efectos nocivos para la transmisión de la capa física. Se trata de encaminamiento basado en la capa física puesto que se elegirán las rutas bajo criterios de calidad de transmisión.

Tabla 26: Clasificación de estrategias PLI-DRWA

Una segunda clasificación de técnicas PLI-DRWA consiste en diferenciar las técnicas por el criterio de viabilidad de los caminos ópticos de transmisión que aplican, que pueden ser OSNR o factor Q. Consúltese referencia [55]:

Si bien, mediante estrategias PLI-DRWA puede garantizarse la calidad de los “*lightpaths*” establecidos, es conveniente el empleo de regeneradores de señal, (3R), en puntos específicos de la red.

Mediante la regeneración de señal puede ampliarse el alcance de transmisión, que puede contabilizarse en número de vanos. Así, rutas más lejanas son viables, proporcionando mayor capacidad de red. En la Ilustración 22 se representa la distorsión del pulso transmitido con la distancia y la propuesta de regeneración (3R), que incluye amplificación, recuperación de la forma y resincronización de la señal.

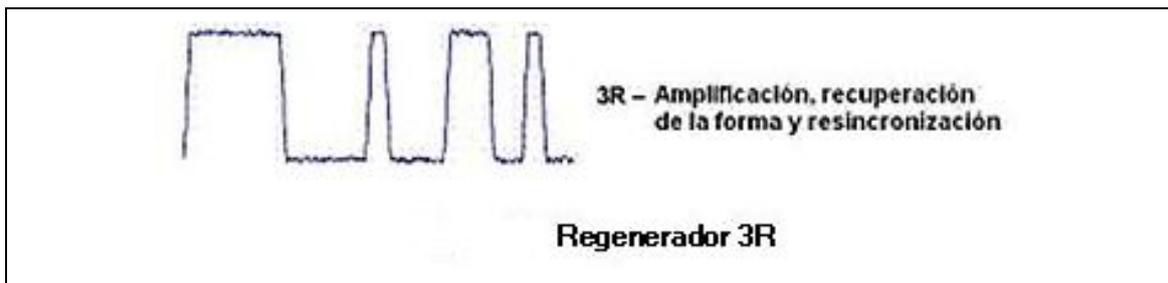


Ilustración 22: Regeneración 3R [11]

Tomada conciencia de la necesidad de regeneración a altas velocidades de transmisión, es algo natural hablar del número de regeneraciones necesarias para establecer un “*lightpath*” físicamente viable para un par origen-destino.

La posibilidad de reconfiguración dinámica de la red a partir de simulaciones “*off-line*”, puede ser una realidad próxima. Sin embargo, hoy día no puede realizarse sin cortar el tráfico.

En los apartados siguientes se presentan algunas de las novedosas propuestas PLI-DRWA presentes en la literatura. Estas propuestas pertenecen al ámbito académico e investigador y, en general, son soluciones de referencia de acuerdo a entornos de simulación controlados. La necesidad de diseñar un algoritmo PLI-DRWA realista y viable para su implementación es un reto que sigue vigente hoy día.

En el capítulo 4 se propone el algoritmo nombrado (“*Impairment Aware Based Routing – First-Fit Wavelength Assignment*”, IABR-FFWA). Esta estrategia, que emplea regeneración, proporciona una solución completa al problema PLI-DRWA mediante algoritmia heurística.

El algoritmo IABR-FFWA aborda el problema PLI-DRWA como dos tareas separadas, (el encaminamiento y la asignación de longitud de onda) reduciendo el tiempo de computación.

3.10 Algoritmos PLI-DRWA

3.10.1 Recomendaciones de la RFC-4054

Criterio PLI-DRWA	Descripción
Limitación debida a efectos físicos	<ul style="list-style-type: none"> - No debe excederse el alcance máximo que garantiza la calidad de señal deseada. - Puede considerarse la calidad de transmisión a través de los enlaces como parte de la función de coste de los mismos. Esto permite seleccionar los enlaces con mejores características de transmisión.
Equilibrado de carga	<ul style="list-style-type: none"> - Permite evitar congestión en el enlace más cargado. - Es un criterio de compromiso respecto al de la viabilidad física de los “<i>lightpaths</i>”.
Criterios de diversidad	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar emplazamientos comunes para las rutas principales y de protección, garantizando la supervivencia de la red.
Criterios de calidad de servicio	<ul style="list-style-type: none"> - Permite seleccionar caminos preferentes (más cortos) para ciertos pares origen-destino.

Tabla 27: Criterios considerados en algoritmos PLI-DRWA

La tendencia generalizada de los OC es la de la adopción progresiva de la RFC-4054 en la que J. Strand y A. L. Chiu [45] describen los principales criterios de diseño de algoritmos PLI-DRWA. Algunos de estos criterios se describen en la Tabla 27.

En la RFC-4054 se propone que el algoritmo PLI-DRWA tenga un enfoque centralizado; es decir, que la gestión del problema se realice mediante un módulo externo, como un PCE.

Los algoritmos PLI-DRWA requieren de información sobre el impacto de los efectos físicos en transmisión. J. Strand y A. L. Chiu proponen la consideración de los efectos físicos en el encaminamiento, mediante la consideración expresa de dos efectos físicos clave:

- Dispersión de modo de polarización, PMD.
- Emisión espontánea en amplificadores, ASE.

Adicionalmente recomiendan la consideración de otros efectos físicos:

- Pérdidas dependientes de polarización, PDL.
- Dispersión Cromática.

- Efectos no lineales.

J. Strand y A. L. Chiu consideran una restricción de relación señal a ruido óptica objetivo, $OSNR_{min}$, como el principal criterio de calidad de señal.

$OSNR(k) \geq OSNR_{min}(k)$, $k=1,2, \dots, M$, representa el número de vano.

Así mismo, proponen el establecimiento de un umbral máximo de PMD que garantice una dispersión máxima.

$PMD(k) \leq PMD_{max}(k)$, $k=1,2, \dots, M$, representa el número de vano.

Los efectos de pérdidas dependientes de polarización y dispersión cromática se considera que pueden compensarse adecuadamente y mantenerse dentro de límites permitidos por enlace.

Los efectos no lineales establecen relaciones de dependencias complejas entre distintas rutas (interferencias). Se considera poco viable la consideración explícita de estos efectos en el encaminamiento, ya que requeriría un conocimiento detallado de la infraestructura física. En cambio, se propone incrementar el nivel de OSNR requerido ($OSNR_{min}$) en las ecuaciones anteriores en 1 ó 2 dB.

Por lo tanto, bajo este enfoque es deseable que las restricciones se cumplan con cierto margen. Sin embargo, es posible que se desee diseñar sistemas menos agresivos respecto a las no linealidades, a cambio de mejorar la escalabilidad, simplicidad y flexibilidad en el encaminamiento y diseño del plano de control.

En la RFC-4054 se apunta a que soluciones conjuntas (R+WA) a las tareas R y WA consiguen unas mejores prestaciones de red.

En los apartados siguientes se presentan técnicas PLI-DRWA representativas presentes en la literatura.

3.10.2 Algoritmos CSP

El objetivo del encaminamiento mediante “*Shortest-Path*” con restricciones, (“*Constrained Shortest-Path*”, CSP), es minimizar el coste de los enlaces utilizados en el camino [102].

Los algoritmos PLI-DRWA están sujetos a una serie de restricciones no triviales de forma independiente a lo considerado en la función de coste. Por ejemplo, una restricción podría ser el retardo total del camino. Otra restricción podría ser la inclusión o no de ciertos nodos. Este tipo de problemas son NP-completos. Se resuelven con algoritmia heurística de encaminamiento.

Las restricciones impuestas sobre la ruta seleccionada pueden ser de los siguientes tipos:

- Restricciones de tipo mínimo/máximo: se exige que el valor mínimo/máximo de una cierta métrica sea mayor/menor que un cierto valor, en todos los enlaces del camino. Por ejemplo podría requerirse que los enlaces tengan un ancho de banda mínimo disponible.
- Restricciones adicionales: son restricciones en la métrica como coste, retardo y número de saltos. Son restricciones adicionales sobre los enlaces del camino.
- Restricciones de inclusión/exclusión: en este tipo de restricciones se incluyen/excluyen nodos o enlaces de un cierto tipo.

Un algoritmo de camino de menor coste con restricciones, CSP, seguiría la siguiente estructura:

1. Crear el grafo de la topología.
2. Ejecutar el algoritmo de Dijkstra y comprobar si se cumplen las restricciones en el camino. Si se cumplen devolver el camino.
3. Encontrar el siguiente camino más corto (P_i) utilizando el algoritmo “*k-Shortest Path*”.
4. Si (P_i) satisface las restricciones devolver el camino.
5. Si el número de caminos encontrados es mayor que (“ k ”), no devolver ruta.
6. Iterar con el paso 3.

Un ejemplo de algoritmo CSP es el algoritmo (“*Conventional DisTance-based*”, CDT). Es una estrategia de encaminamiento fijo o fijo alternado, en la cual se minimiza el impacto de efectos físicos acumulativos. Para mayor información consúltese [75].

3.10.3 Algoritmo B-OSNR

R. Cardillo presenta una propuesta algorítmica PLIA-DRWA de camino de menor coste con restricciones, CSP, que consiste en seleccionar la ruta que maximice la OSNR (“*Best-OSNR*”, B-OSNR) [103].

El algoritmo B-OSNR tiene como objetivo minimizar el impacto de los efectos físicos sobre la transmisión, garantizando la calidad de los “*lighpaths*” establecidos. El algoritmo se describe a continuación:

- Para establecer el parámetro de OSNR en recepción se tienen en cuenta los efectos del ruido ASE y penalizaciones en OSNR debidas a efectos lineales y no lineales [104].
- Este modelo que se formula a continuación, ha sido ampliamente aceptado y extendido.

$$OSNR = OSNR_{ASE} - OSNR_{pen,lin} - OSNR_{pen,nl}$$

- Donde:

$OSNR_{ASE}$ Es la OSNR existente debido al efecto de emisión espontánea de amplificación.

$OSNR_{pen,lin}$ Es una penalización en decibelios (dB) debida a efectos físicos lineales.

$OSNR_{pen,nl}$ Es una penalización en decibelios (dB) debida a efectos físicos no lineales.

- El objetivo del algoritmo es garantizar que, para la ruta seleccionada, la OSNR del sistema en recepción sea mayor que la OSNR objetivo ($OSNR_{min}$).

$$OSNR \geq OSNR_{min}$$

- De esta forma la BER se puede obtener directamente a partir del valor de OSNR [109]. Por lo tanto se debe cumplir:

$$BER \leq BER_{max}$$

En la Ilustración 23 se observa que la probabilidad de bloqueo se minimiza para vanos de 80 (km), con la algoritmia de encaminamiento LCP, combinado con asignación de longitud de onda mediante FF si el porcentaje de carga de la red es inferior al 60 por ciento. Para porcentajes de carga de red mayores los resultados mediante LCP-FF y B-OSNR son semejantes.

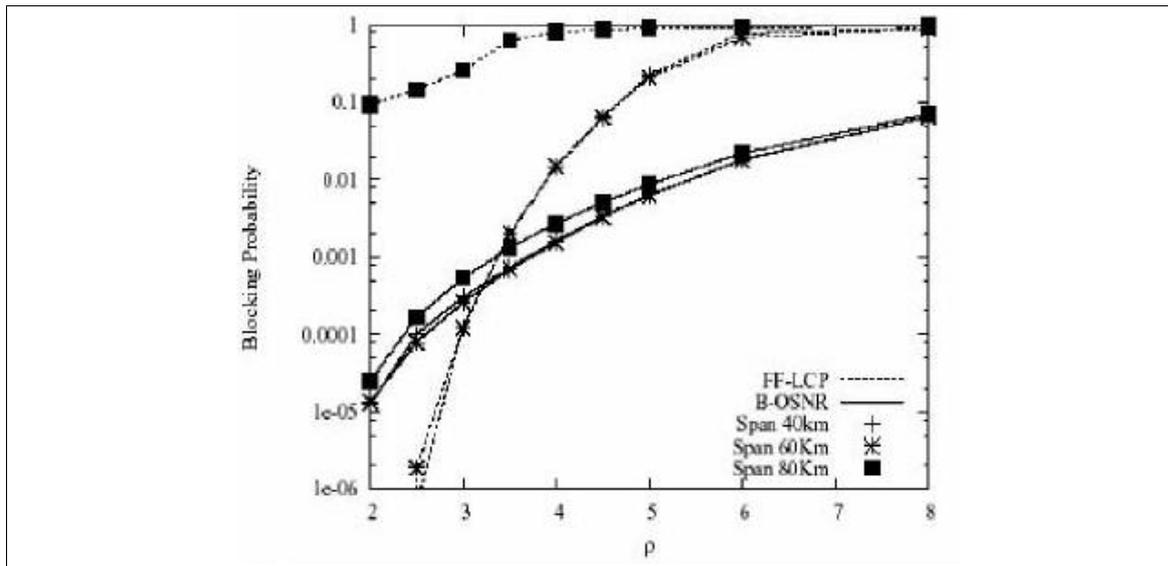


Ilustración 23: Probabilidad de bloqueo de B-OSNR vs FF-LCP [65]

3.10.4 Algoritmo ICBR basado en factor Q

I. Tomkos propone un algoritmo de encaminamiento para el problema RWA con restricciones debidas a los efectos físicos (“*Impairment Constraint Based Routing*”, ICBR). Su propuesta desarrolla un modelo analítico de factor Q con sus penalizaciones asociadas [76].

El modelo de factor Q está adaptado a las características de transmisión de redes metropolitanas (“*Metropolitan Area Network*”, MAN). Una red óptica de ámbito metropolitano puede tener vanos más cortos que las redes troncales y la potencia inyectada por canal puede ser relativamente baja (sin provocar excesiva penalización por ruido), por lo que el modelo considera sólo efectos de transmisión lineales. I. Tomkos considera que los efectos no lineales no tienen un impacto significativo sobre redes MAN.

Este modelo emplea la herramienta “diagrama de ojos” para visualizar la forma de onda transmitida. Un estrechamiento en este diagrama puede señalar los errores potenciales en la decodificación de bits en el receptor. Se atribuye un estrechamiento en el “diagrama de ojos”, conocido como “penalización de ojo”, debida efectos físicos como PMD, CD y concatenación de filtros. También se atribuye una penalización por ruido debida a efectos ASE y diafonía.

- Sea:
 - Q_{out} Es el factor de calidad en el nodo destino de la conexión.
 - Q_{in} Es el factor de calidad en el nodo origen de la conexión.

- De acuerdo a la fórmula a continuación, aplicada a redes Metro, el factor Q en el nodo destino se obtiene a partir del factor Q en el nodo origen de la conexión, disminuida debido a penalizaciones atribuidas a ciertos efectos físicos y al ruido:

$$Q_{out} = (\text{Penalización de ojo}) * (\text{Penalización de ruido}) * Q_{in}$$

El algoritmo ICBR se propone para una demanda total conocida y para redes Metro, pero igualmente pueden utilizarse algunos de los conceptos que incorpora la propuesta para el desarrollo de algoritmos en tiempo real.

El algoritmo ICBR propuesto está compuesto por tres fases:

1. La primera fase es de procesamiento de la información de características de red y demandas de tráfico recogidas. Basándose en estos parámetros, I. Tomkos calcula el coste de los enlaces que posteriormente pueden utilizarse para encontrar los posibles caminos.
2. Una vez se calculan los costes de los enlaces, la segunda fase asigna caminos y longitudes de onda a todas las demandas mediante un módulo convencional RWA, por ejemplo mediante algoritmo de camino más corto (“*K-shortest-path*”). Tras identificar posibles “k-caminos” para cada solicitud de conexión, Tomkos resuelve un problema de optimización lineal para minimizar el coste global de la red.
3. La tercera fase comprueba la calidad de los “*lightpaths*” seleccionados en la segunda fase mediante el factor Q, modelado para incluir defectos físicos en la red. El factor Q se utiliza como función de coste de los enlaces.
 - a. Si el “*lightpath*” propuesto satisface los requisitos de calidad de señal, se establece el camino.
 - b. Si no los satisface se borra el camino del conjunto de k-caminos más corto y se llama a la fase RWA de nuevo. Si ninguno de los caminos satisfacen los efectos físicos, se bloquea la conexión.

El algoritmo ICBR de I. Tomkos mejora el funcionamiento global de la red respecto a al algoritmo de menor coste, SP.

3.10.5 Algoritmo IABR basado en factor Q

C. T. Politi propone un algoritmo de encaminamiento dinámico que considera los efectos de la capa física en su función de coste (“*Impairment Aware Based Routing*”, IABR) [105].

Realiza una función de coste basada en factor Q, en la cual incluye efectos de FWM, XPM y degradación de OSNR. También considera el aumento de interferencia

intercanal debido a no linealidades que aumentan con el número de longitudes de onda asignadas.

C. T. Politi considera peticiones dinámicas, con tiempo de vida constante de 1 unidad de tiempo, tiempo entre llegadas de distribución poissoniana de 10 unidades de tiempo. Está sujeto a la restricción de continuidad de longitud de onda y no se utiliza regeneración de señal.

El motor del algoritmo permite el establecimiento del “*lightpath*” de acuerdo a dos funciones de coste mientras comprueba el factor Q de los “*lightpaths*”. Dichas funciones de coste son SP o el camino de menor coste más amplio (“*Shortest-Widest Path*”, SWP). Los algoritmos SWP son aquellos que realizan equilibrado de carga, por ejemplo LCP.

En la Ilustración 24 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo:

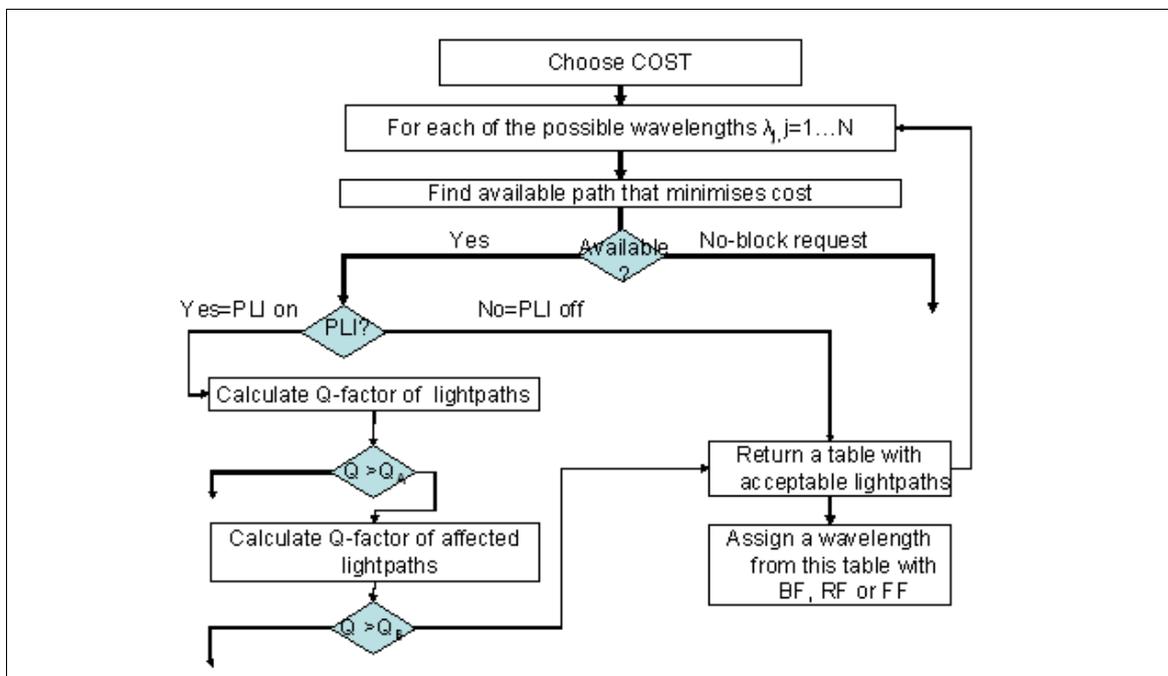


Ilustración 24: Diagrama de flujo del algoritmo IABR de C. T. Politi [105]

Como puede observarse en el diagrama de flujo no sólo se considera la calidad del nuevo “*lightpath*” que se desea establecer sino que su efecto sobre los “*lightpaths*” ya establecidos no sea crítico.

La función de coste tiene en cuenta criterios de camino más corto, equilibrado de carga y el impacto de efectos físicos. La dispersión cromática se considera compensada.

Los efectos de FWM y XPM intercanal se modelan para un sistema a 10 (Gbps) con espaciado intercanal de 50 (GHz). La potencia por canal es de $PSM \pm 3$ (dBm).

$$Q \approx RP_{SM}/[\sigma_0 + \sigma_1]$$

Donde:

$$-\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{th}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{spont-spont}^2}$$

$$-\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{th}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{sig-spont}^2 + \sigma_{spont-spont}^2 + \sigma_{XPM}^2 + \sigma_{FWM}^2}$$

– σ_{th} es el ruido térmico.

– σ_{shot} es el ruido de shot.

– $\sigma_{spont-spont}$ es el ruido de emisión espontánea ASE.

– $\sigma_{sig-spont}$ es la emisión espontánea de señal.

– σ_{FWM} es la desviación estándar de FWM modelado.

– σ_{XPM} es la desviación estándar de XPM modelado.

En la Ilustración 25 se representan los resultados obtenidos mediante el algoritmo IABR en términos de probabilidad de bloqueo (figura izquierda) y de equilibrado de carga (figura derecha).

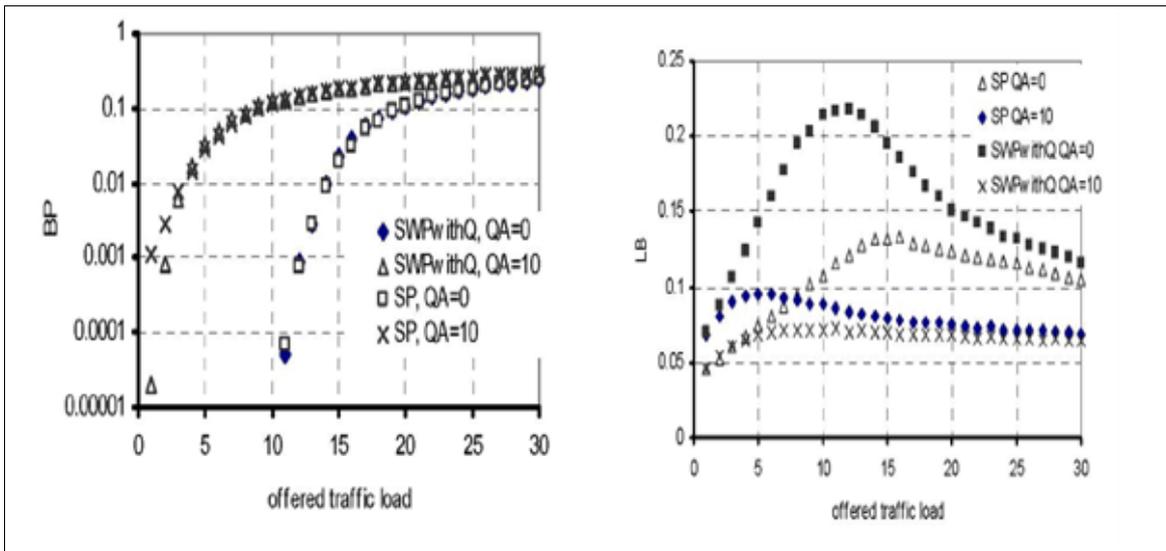


Ilustración 25: Prestaciones IABR [105]

- Q_A es el umbral de calidad de señal requerido para el nuevo *lightpath*.

Para obtener mejores resultados en término de probabilidad de bloqueo (Ilustración 25, figura izquierda), los mejores resultados se obtienen tanto mediante una función de coste SP, como SWP con umbral QA igual a 0. Pero si el umbral sube a QA igual a 10 se aprecia que los resultados son ligeramente mejores mediante SWP.

En la figura derecha se aprecia que el mayor equilibrado de red se obtiene mediante SWP con umbral QA igual a 10.

3.10.6 Algoritmo DOIC

N. Zulkifli, y C. Okonkwo proponen en la referencia [54] el algoritmo (“*Dispersion Optimised Impairment Constraint-based RWA*”, DOIC), que considera restricciones de OSNR y CD.

El algoritmo DOIC considera la pérdida de OSNR por efecto de la potencia de ruido ASE en amplificación. La potencia de ruido después de (“k”) etapas es el ruido acumulado de las etapas anteriores más el propio de la etapa (“k”):

$$P_{ASE}(k)TOTAL = P_{ASE}(k-1) * L_f(k) * G_{EDFA}(k) + P_{ASE}(k)$$

Donde:

- L_f y G_{EDFA} son las pérdidas de la fibra y la ganancia del amplificador en la etapa k, respectivamente.

La potencia de señal en la etapa (“k”) es la potencia de señal en la etapa anterior por las pérdidas de fibra y la ganancia de amplificación en la etapa actual:

$$P_{SEÑAL}(k) = P_{SEÑAL}(k-1) * L_f(k) * G_{EDFA}(k)$$

Así la OSNR del sistema es la relación entre la potencia de señal en la etapa final, (“M”), que concluye en el nodo destino (“*egress node*”) y la potencia de ruido ASE acumulado en dicha etapa:

$$OSNR_{SISTEMA} = \frac{P_{SEÑAL}(M)}{P_{ASE}(M)TOTAL}$$

Sea:

- $OSNR_{IN}$ es la OSNR de entrada en el transmisor.

A continuación se expresa la relación entre la OSNR recibida $OSNR_{RCVD}$ y la OSNR del sistema:

$$(OSNR_{RCVD})^{-1} = (OSNR_{IN} + OSNR_{SISTEMA})^{-1}$$

Para que el camino sea válido debe cumplir un umbral mínimo de OSNR:

$$OSNR_{RCVD} \geq OSNR_{UMBRAL}$$

N. Zulkifli, y C. Okonkwo consideran la pendiente de la dispersión cromática para velocidades a partir de 10 Gbps, ya que la tolerancia a la CD se reduce por la raíz cuadrada de la tasa de bits.

Este algoritmo incluye restricciones físicas tanto en la tarea de encaminamiento, R, como en la asignación de longitud de onda, WA, de la siguiente manera:

- En el encaminamiento se incluyen restricciones de CD y OSNR.
- Una vez se ha realizado el encaminamiento, se asigna una longitud de onda (“ λ ”) que esté dentro de un rango de dispersión aceptable para la tasa de datos de transmisión.

Los autores consideran que esta estrategia disminuye la probabilidad de bloqueo para futuras conexiones.

En DOIC se ordenan las longitudes de onda por su dispersión cromática residual según la siguiente fórmula:

$$RD_{\lambda n} = D_{\lambda n} (SMF) * SMF Length + D_{\lambda n} (DCF) * DCF Length$$

$$D_{\lambda n} = D_{\lambda Ref} \pm \Delta D$$

$$\Delta D = \Delta \lambda * S$$

Donde:

- $D_{\lambda n}$ Es el coeficiente de dispersión cromática de la longitud de onda n^{th} $ps/(nm * km)$.
- $D_{\lambda Ref}$ Es el coeficiente de dispersión de la longitud de onda de referencia $ps/(nm * km)$.
- ΔD Es la diferencia entre $D_{\lambda Ref}$ y $D_{\lambda n}$.
- $\Delta \lambda$ Es la diferencia entre la longitud de onda n^{th} y la longitud de onda de referencia (nm).
- S Es la pendiente de dispersión $ps/(nm^2 * km)$.

Sea:

- (“k”) igual a 100000.
- (“B”) es la tasa de bits.

Para tasas de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps se suele utilizar un umbral de dispersión cromática descrito en [64].

$$CD threshold = k/B^2$$

El encaminamiento en el algoritmo DOIC se realiza del siguiente modo.

Sea:

- $d_{i,k}$ es la distancia (km) entre los extremos (i-k) del enlace.
- $|RD(j)|$ es el valor absoluto de la dispersión cromática residual, para la longitud de onda (“ λ_j ”).
- (“*Smallest Residual Dispersion*”, SRD) es la longitud de onda de menor dispersión cromática residual.

El coste por enlace (“ $l_{i,k}$ ”) depende de la suma de dispersión cromática residual de las longitudes de onda a través de dicho enlace. La función de coste se pondera por la distancia del enlace en (km), y la dispersión residual mínima en alguna longitud de onda.

$$DOIC(l_{i,k}) = \frac{d_{i,k} * \sum_{j=1}^N |RD(j)|}{SRD * \sum_{j=1}^N 1/|RD(j)|}$$

La selección de longitud de onda se realiza de la siguiente manera:

- Se selecciona una longitud de onda que cumpla una dispersión aceptable dentro de un rango que depende de la tasa de bits de transmisión, y que a su vez minimice la probabilidad de bloqueo de futuras conexiones, puesto que se elige la longitud de onda más próxima al umbral máximo permitido. En el caso de un entorno a distintas tasas de transmisión, se selecciona un umbral distinto para cada velocidad de transmisión.

En resumen, este conjunto de algoritmos propuestos tiene las siguientes características:

1. Ordenación de las longitudes de onda disponibles, por mínima dispersión residual.
2. Encaminamiento que minimiza la dispersión cromática residual y de la distancia mediante una función de coste/enlace que incluye ambos efectos, función de coste DOIC. Selección del camino de menor coste según el criterio anterior. Se selecciona el camino de menor dispersión cromática residual.
3. Se comprueba que el camino seleccionado es válido. Se considera un camino válido cuando supera un umbral de OSNR mínimo. Dicho umbral depende del número de etapas amplificadoras y de la tasa de bits. En la función de cómputo del OSNR se tiene en cuenta el ruido introducido por los amplificadores (ruido ASE) únicamente.
4. Se establece adicionalmente un umbral máximo de CD dependiente de la distancia, que también es necesario validar en el camino seleccionado:

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

Las simulaciones de este algoritmo se realizan para muy baja PMD ($<0.05 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$). Por lo tanto se espera que los resultados en probabilidad de bloqueo aumenten en escenarios más realistas con PMD mayor y a 40 Gbps.

En la Ilustración 26 Zulkifli obtiene mejores resultados en cuanto a probabilidad de bloqueo mediante el algoritmo DOIC, que mediante los algoritmos CDT y MFC.

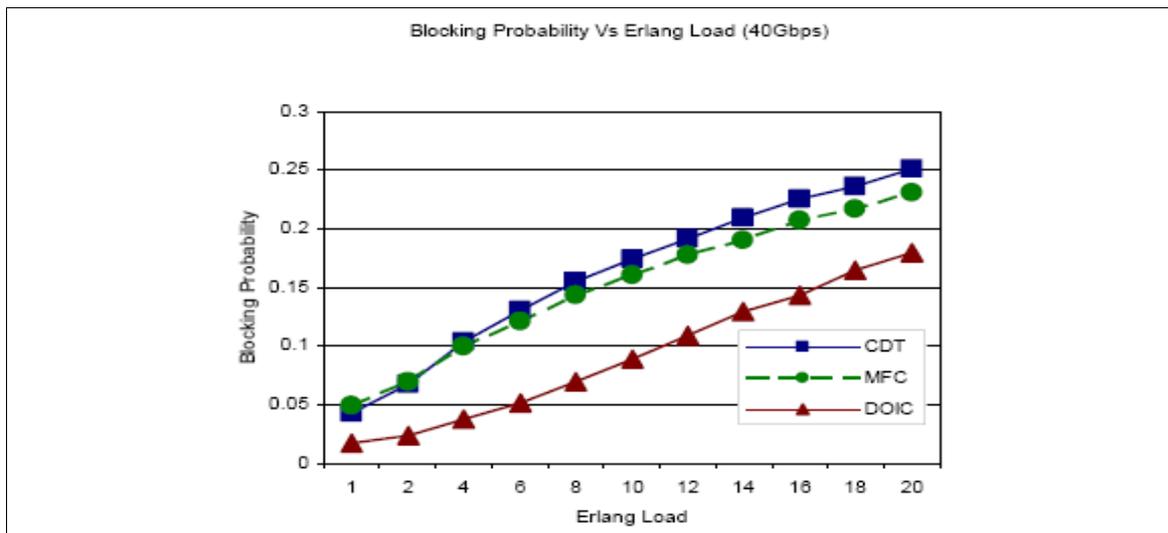


Ilustración 26: Probabilidad de bloqueo DOIC vs MFC y vs CDT [54]

3.11 Asignación de longitud de onda considerando efectos físicos

La consideración de efectos físicos en la tarea WA es poco frecuente. Sin embargo, se han incorporado recientemente algoritmos WA que tienen en cuenta los efectos físicos sobre las longitudes de onda (“ λ_s ”).

Bajo esta tendencia se ordenan las longitudes de onda disponibles, (“ λ_A ”) de forma que se minimice el impacto de algún efecto físico (no lineal). Por ejemplo pueden minimizarse el número de puertos adyacentes utilizados, lo que lleva consigo una mínima diafonía.

Otro ejemplo es el algoritmo (“*Dispersion Optimised Impairment Constraint RWA*”, DOIC), que utiliza la información de dispersión cromática residual en la tarea WA.

El algoritmo DOIC se basa en el hecho de que hay un pequeño margen de dispersión cromática residual, que es difícil compensar en el receptor, en el caso de que ésta se salga del margen de compensación. El efecto de la dispersión cromática residual sería

distinto en cada canal, lo que justificaría el criterio de selección de una longitud de onda respecto a otra. Una descripción completa del algoritmo se encuentra en la referencia [54].

En la Tabla 28 se presentan técnicas WA que consideran efectos físicos.

Algoritmo	Objetivo
<i>DOIC</i> [75]	Minimiza el efecto de la dispersión cromática residual. El efecto de la dispersión cromática residual sería distinto en cada canal, lo que justificaría el criterio de selección de una longitud de onda respecto a otra.
<i>Min FWM</i> [110]	Algoritmo basado en minimizar la diafonía FWM.
<i>Grooming-QoS</i> [111]	Algoritmo que considera la dispersión cromática residual en la asignación de longitud de onda, así como criterios de QoS.
<i>Min Crosstalk</i> [112]	Algoritmo basado en la minimización del impacto del nuevo “ <i>lighpath</i> ” sobre los caminos ópticos anteriormente establecidos.

Tabla 28: Técnicas de asignación de longitud de onda considerando efectos físicos

CAPÍTULO IV

4. PROPUESTA ALGORÍTMICA DE IABR-FFWA

4.1 Motivación del algoritmo IABR-FFWA

El algoritmo (*“Impairment Aware Based Routing – First-Fit Wavelength Assignment”*, IABR-FFWA) se diseña con el objetivo de proporcionar una solución completa, eficaz y realista al problema PLI-DRWA, mediante algoritmia heurística.

Mediante el algoritmo IABR-FFWA se atiende a las tareas R y WA de forma separada, garantizando el funcionamiento de la malla fotónica en tiempo real. Para ello, el algoritmo IABR-FFWA requiere de un tiempo limitado de procesado de petición (del orden de ms).

Respecto a las propuestas clásicas, el algoritmo IABR-FFWA garantiza la viabilidad física de los *“lightpaths”* establecidos. Son escasas las propuestas PLI-DRWA presentes en la literatura y las existentes pertenecen al ámbito académico por lo que sus buenas prestaciones están condicionadas a entornos de simulación específicos.

El algoritmo IABR-FFWA proporciona una solución viable para su implementación al problema PLI-DRWA, supliendo la carencia actual de algoritmos de este tipo con orientación a entornos de transmisión reales.

4.2 Descripción del algoritmo IABR-FFWA

El algoritmo IABR-FFWA es un algoritmo PLIA-DRWA heurístico que emplea la técnica de camino más corto con restricciones, CSP, como motor.

Para la tarea de encaminamiento, R, el algoritmo IABR-FFWA considera en la función de coste de los enlaces criterios de OSNR y “Carga” de los mismos. De esta manera se adecúa a los requisitos actuales de calidad de transmisión, QoT.

Cumpliendo con otra característica de los algoritmos PLI-DRWA, la propuesta presentada comprueba la viabilidad física de los caminos calculados, mediante el establecimiento de umbrales específicos dependientes de las características de transmisión, concretamente la OSNR mínima requerida y la PMD máxima permitida.

Efectos físicos no lineales como XPM, SPM y FWM se consideran implícitamente mediante el establecimiento de un pequeño margen en la OSNR objetivo.

La dispersión cromática se considera compensada mediante módulos compensadores DCM. También se considera que por el tipo de filtros utilizados, LCOS, el impacto de concatenación de filtros no es relevante.

Debido al fuerte impacto de los fenómenos físicos en la disminución de calidad transmitida a medida que aumenta la distancia, la necesidad de regeneración, al menos en nodos específicos, resulta evidente.

Para ello el algoritmo IABR-FFWA es un algoritmo en dos fases:

- “*Etapa Base IABR-FFWA*”.
- “*Etapa Avanzada en Dos Tramos IABR-FFWA*”.

En la “*Etapa Base IABR-FFWA*” se emplea como técnica de encaminamiento un (“*k-Shortest-Path con restricciones*”, k-CSP). En el caso de que las restricciones físicas impidan el establecimiento de “*lightpaths*” viables se recurre a la “*Etapa avanzada en dos tramos*”. El cómputo de caminos en dos tramos mediante regeneración (3R), permite alcanzar mayores distancias de transmisión con garantías de calidad de señal.

Cada uno de los tramos emplea a su vez un encaminamiento CSP. Como técnica WA se emplea la técnica (“*First-Fit*”, FF), mediante la cual se obtienen buenos resultados.

En los apartados siguientes se describen en detalle los mecanismos de cada etapa algorítmica.

4.2.1 Descripción de la Etapa Base IABR-FFWA

La “*Etapa Base IABR-FFWA*” emplea como técnica de encaminamiento un (“*k-Shortest-Path con restricciones*”, k-CSP), basado en el algoritmo de Q. Vieira Martins [93].

Una mejora adicional para evitar el cómputo de caminos a través de enlaces congestionados consiste en que, cuando un enlace está “*lleno*”, se pone su coste a infinito evitando su selección en próximos “*lightpaths*”.

La etapa base IABR-FFWA procede de la siguiente manera:

- Se calcula un número de caminos determinado por el factor (“*k*”) y se comprueba el cumplimiento de las restricciones físicas mediante el establecimiento de umbrales de OSNR mínima y PMD máxima. Estos umbrales dependen de la velocidad de transmisión y del formato de modulación.
- Se comprueba la disponibilidad de longitud de onda, (“ λ ”), también conocida como “*lambda*”, a lo largo del mismo, mediante la técnica FF.
- Si se obtiene un camino físicamente viable y una longitud de onda disponible, (“ λ_A ”), a lo largo del camino y se establece un “*lightpath*” ocupando los recursos calculados. En caso contrario, se realizan estas mismas comprobaciones para el siguiente de los (“*k*”) caminos calculados.
- En el caso de no encontrar un camino viable físicamente, comprobados los (“*k*”) caminos y habiendo alguna longitud de onda disponible a lo largo de las rutas; es decir, que la limitación son las restricciones físicas, se procede a la ejecución de la “*Etapa Avanzada en Dos Tramos*”.

4.2.2 Descripción de la Etapa Avanzada en Dos Tramos

La “*Etapa Avanzada en Dos Tramos IABR-FFWA*” hace uso de la capacidad de regeneración de algunos nodos para establecer “*lightpaths*” en dos tramos de la siguiente manera:

1. Se establece un primer tramo desde el nodo origen a un nodo intermedio con capacidad de regeneración (3R).
2. Se establece un segundo tramo desde el nodo intermedio mencionado al nodo destino.

Para el cómputo de ambos tramos se emplea la mencionada técnica de encaminamiento CSP. Es necesaria la validación de restricciones físicas en ambos tramos, mediante umbrales de OSNR y PMD.

En el caso de no obtenerse la calidad de señal mínima necesaria en el primer tramo, se descarta el camino calculado, y se computa un nuevo camino desde el nodo origen al nodo con capacidad de regeneración siguiente en prioridad. Bajo criterios de equilibrado de carga en la función de coste, los caminos a través de los nodos con capacidad de regeneración de mayor prioridad podrían ser más largos, y por lo tanto, presentar menores niveles de calidad.

Por simplicidad, se mantiene la restricción de continuidad de longitud de onda a lo largo de los dos tramos del camino.

4.3 Flujo del algoritmo IABR-FFWA

En la Ilustración 27 se presenta el diagrama de flujo de la etapa base del algoritmo IABRR-FFWA, que incluye como técnica de encaminamiento un k-CSP, y como técnica de asignación de longitud de onda el algoritmo FF.

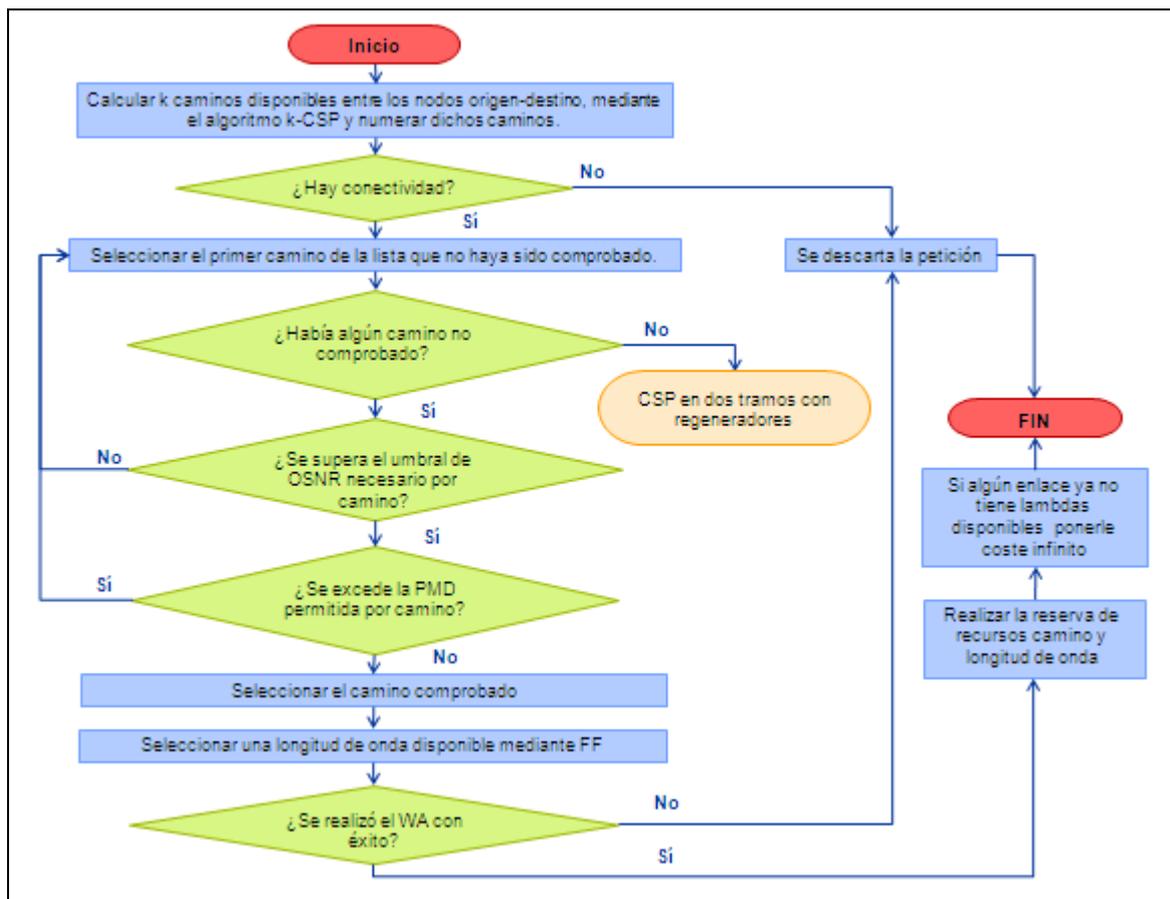


Ilustración 27: Etapa base del algoritmo IABR-FFWA

El diagrama de flujo de la etapa avanzada en dos tramos del algoritmo IABR-FFWA, es un CSP en dos tramos con asignación de longitud de onda mediante la técnica FF. En

las Ilustraciones 28 y 29 se representa el flujo del primer y segundo tramo del algoritmo, respectivamente.

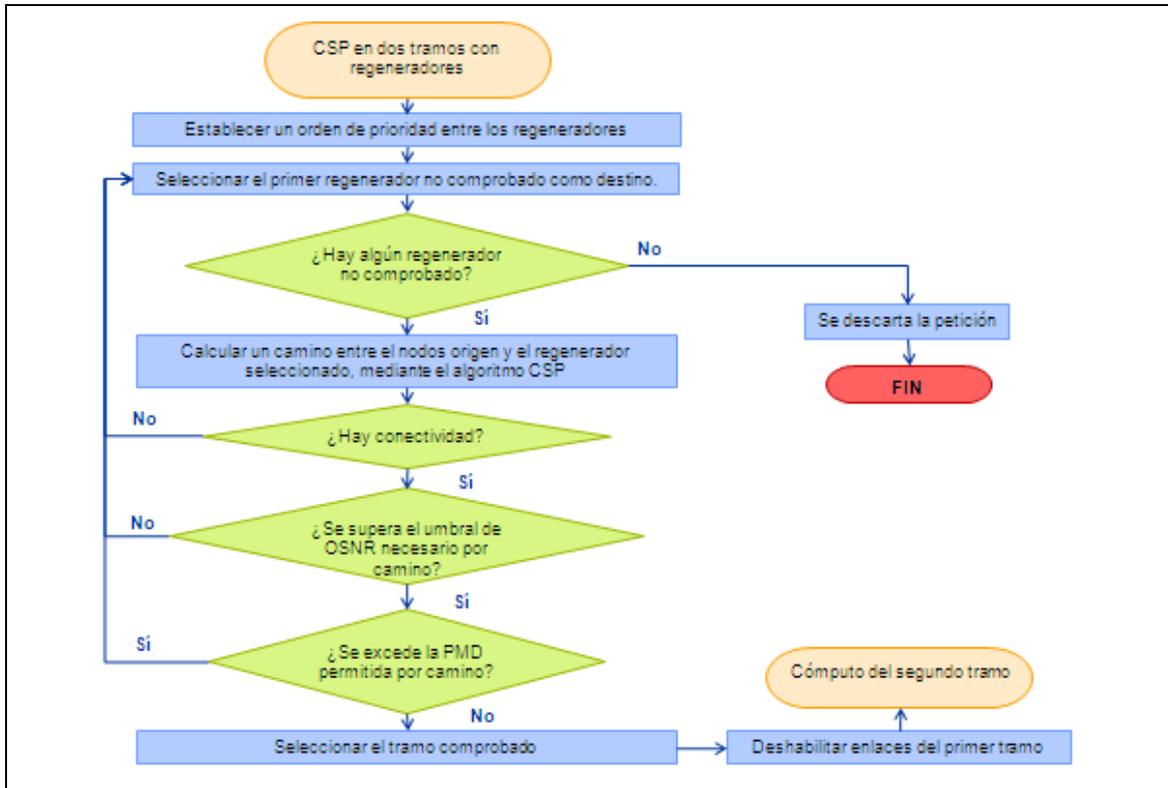


Ilustración 28: Primer tramo de la etapa avanzada del algoritmo IABR-FFWA

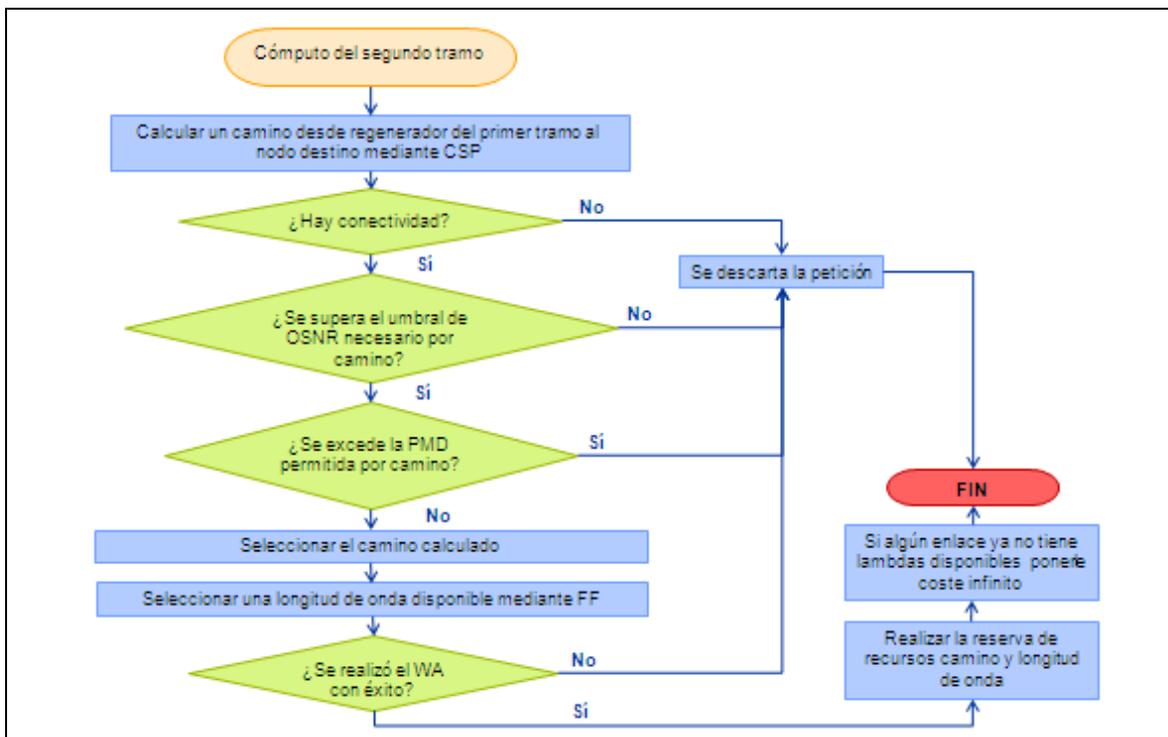


Ilustración 29: Segundo tramo de la etapa avanzada del algoritmo IABR-FFWA

Descripción de los pasos del algoritmo IABR-FFWA

1. Calcular (“k”) caminos disponibles entre el par de nodos origen-destino, mediante la técnica “*k-Shortest-Path con restricciones*”, dado el coste de cada enlace. Numerarlos según el orden de obtención.
2. Seleccionar el primer camino numerado de la lista que no haya sido comprobado. Si todos los caminos han sido comprobados pasar a 7.
3. Comprobar que se supera el umbral de OSNR necesario por camino.
 - Si no se supera el umbral descartar el camino y pasar a 2.
 - Si se supera el umbral pasar a 4.
4. Comprobar que no se excede el máximo PMD permitido por camino.
 - Si se excede descartar el camino y pasar a 2.
 - Si no se excede, pasar a 5.
5. Seleccionar el camino y pasar a 6.
6. Seleccionar una longitud de onda mediante la técnica “*First-Fit*”.
 - Si se ha realizado con éxito se procede a la reserva del camino y longitud de onda. Si alguno de los enlaces asignados se ha llenado, poner el coste del enlace a infinito. FIN
 - Si no se ha realizado con éxito, se descarta la petición. FIN
7. Ordenar los regeneradores según preferencia.
8. Seleccionar un regenerador no seleccionado anteriormente y pasar a 9. Si no hubiera regeneradores no comprobados, se descarta la petición. FIN
9. Calcular un camino disponible entre el nodo origen de la petición y el regenerador seleccionado mediante la técnica “*Shortest-Path*”, dado el coste de cada enlace.
10. Para el camino calculado, comprobar que se supera el umbral de OSNR necesario por camino.
 - Si no se supera el umbral descartar el camino y pasar a 8.
 - Si se supera el umbral pasar a 11.
11. Para el camino calculado, comprobar que no se excede el máximo PMD permitido por camino.

- Si se excede descartar el camino y pasar a 8.
 - Si no se excede, pasar a 12.
12. Seleccionar el camino y pasar a 13.
13. Calcular un camino disponible entre regenerador del camino seleccionado y el nodo destino de la petición mediante la técnica “*Shortest-Path*”, dado el coste de cada enlace.
14. Para el camino calculado, comprobar que se supera el umbral de OSNR necesario por camino.
- Si no se supera el umbral descartar la petición. FIN.
 - Si se supera el umbral pasar a 15.
15. Para el camino calculado, comprobar que no se excede el máximo PMD permitido por camino.
- Si se excede descartar la petición. FIN.
 - Si no se excede, pasar a 17.
16. Seleccionar el camino y pasar a 18.
17. Seleccionar una misma longitud de onda mediante la técnica “*First-Fit*” para los dos tramos de camino calculados.
- Si se ha realizado con éxito se procede a la reserva del camino y longitud de onda. Si alguno de los enlaces asignados se ha llenado poner el coste del enlace a infinito. FIN
 - Si no se ha realizado con éxito, se descarta la petición. FIN

4.4 Función de coste diseñada

Se propone una función de coste dinámica IABR-FFWA con pesos parametrizables para los siguientes criterios:

- La OSNR de los enlaces debido al efecto ASE.
- La carga de los enlaces.

Adaptando dicha función de coste a la topología de red, tipo de tráfico y demás características de transmisión es posible mejorar las prestaciones de red o bien ampliar el tiempo de vida de la misma.

Obtención del coste debido a OSNR

Para elaborar una función matemática que represente el coste debido a OSNR se ha obtenido la pérdida de OSNR a 40 Gbps dependiendo del número de vanos. Esta relación ha resultado ser una función lineal. Es lógico pensar que la pérdida de OSNR sea lineal con la distancia.

En la Ilustración 30 se representa la pérdida de OSNR por vano a 40 Gbps y modulación DQPSK. A partir de la recta obtenida $y = 0,123x + 0,004$ se ha elaborado una función de coste adecuada.

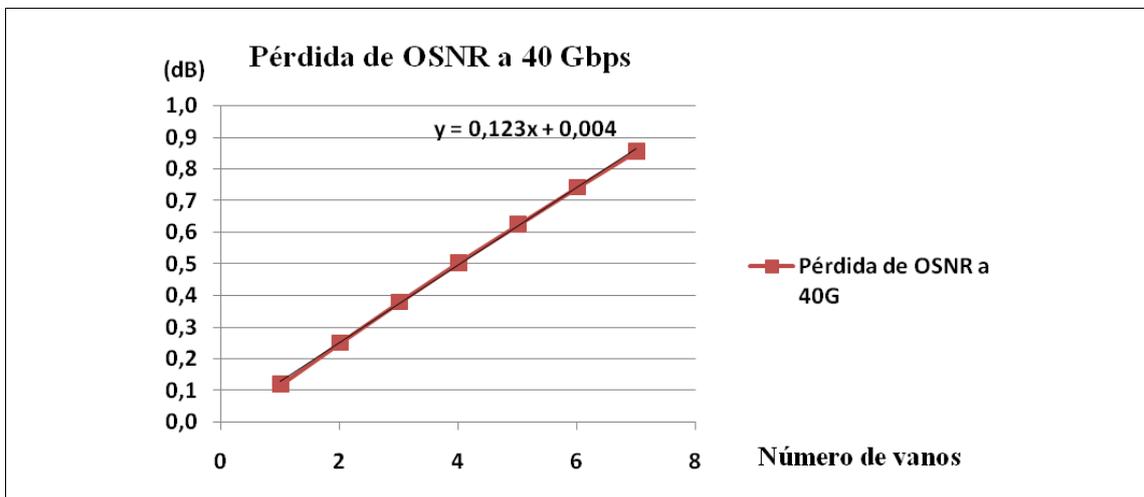


Ilustración 30: Pérdida de OSNR a 40Gbps

En la Ilustración 31 se representa la función de coste debida a OSNR a 40Gbps.

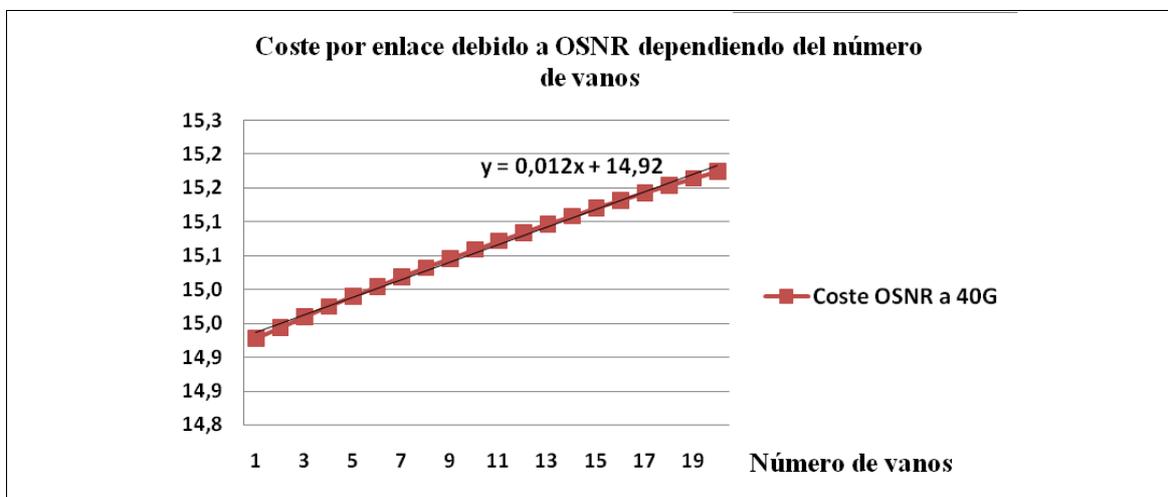


Ilustración 31: Función de coste de OSNR a 40Gbps

La función de coste de enlace debida a OSNR es la siguiente:

$$coste_{OSNR_{40Gbps}} = 17 - 0.123 * OSNR_{enlace} + 0.004$$

$$coste_{OSNR_{10Gbps}} = 20 - 0.123 * OSNR_{enlace} + 0.004$$

Obtención del coste debido a la carga de los enlaces

En la Ilustración 32 se representa la función de coste IABR-FFWA debida a la carga de los enlaces presentada. Como puede observarse es una función en dos tramos, dependiendo de un umbral de carga establecido. El primer tramo tiene un coste muy bajo, por considerarse que los enlaces tienen suficientes longitudes de onda disponibles.

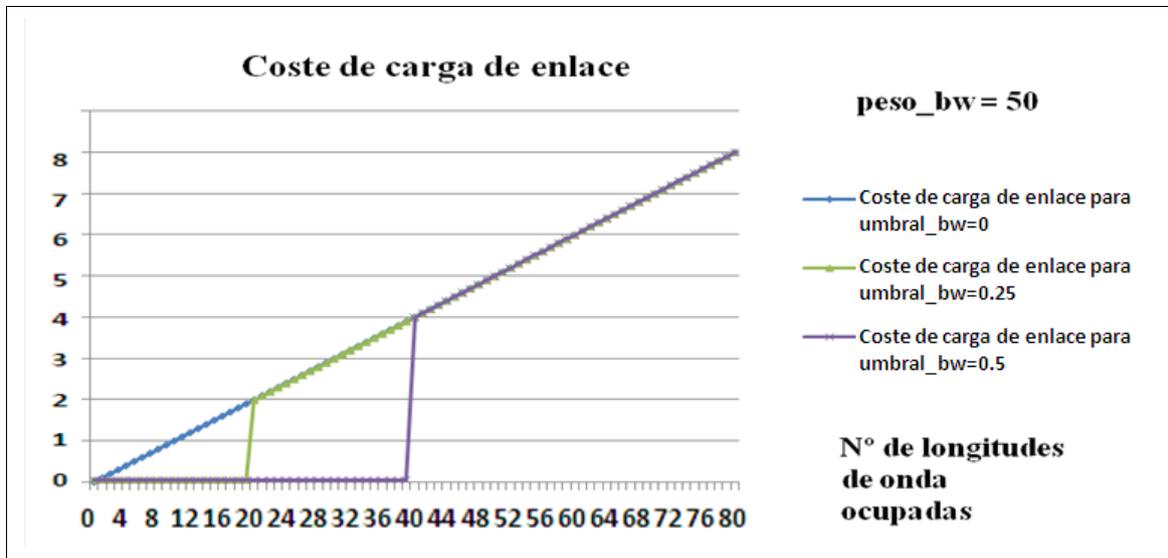


Ilustración 32: Coste de carga de enlace

La función de coste de enlace debida a su carga es la siguiente:

$$coste_{bw} = \frac{peso_{bw}}{N_{lambdas} * 10} \quad si \quad \frac{lambdas_{ocupadas}}{N_{lambdas}} < umbral_{bw}$$

$$coste_{bw} = \frac{lambdas_{ocupadas}}{N_{lambdas} * 10} \quad si \quad \frac{lambdas_{ocupadas}}{N_{lambdas}} \geq umbral_{bw}$$

La función de coste total por enlace pondera la influencia de OSNR y carga de enlace.

$$coste_{total} = peso_{OSNR} * coste_{OSNR} + peso_{carga} * coste_{carga}$$

$$peso_{OSNR} + peso_{carga} = 1$$

$$0 \leq peso_{OSNR} \leq 1$$

$$0 \leq \text{peso}_{\text{carga}} \leq 1$$

En la Ilustración 33 se representa el coste total por enlace de la función de coste diseñada. El coste total de cada enlace es una ponderación de ambos efectos OSNR y carga de enlace y se recalcula dinámicamente.

Como puede observarse en la figura, cuando los enlaces están descargados si el peso de la carga de los enlaces es de un 50% o mayor, el coste total es muy similar (rectas verde y roja). Sin embargo, ambas líneas se separan a medida que se cargan los enlaces teniendo un mayor crecimiento aquella que atribuye un mayor peso a la carga de los enlaces (recta verde).

La recta azul que atribuye un coste igual a ambos efectos tiene un coste inferior para cualquier estado de la red. Sin embargo, la recta roja que atribuye un mayor peso a la OSNR se acerca a la recta azul cuando el enlace está “lleno”.

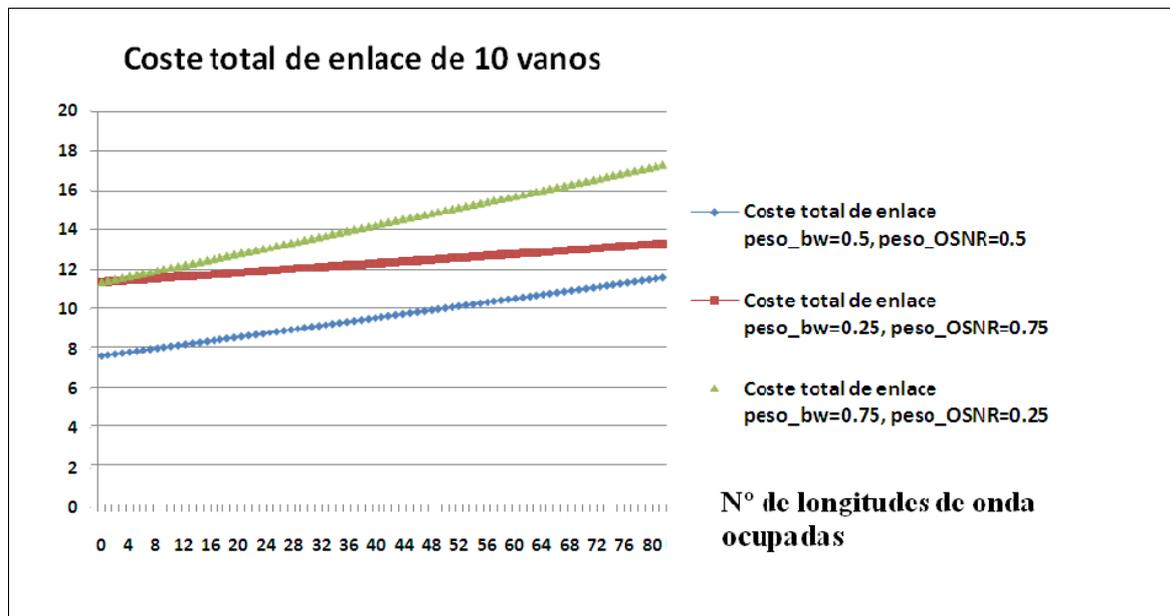


Ilustración 33: Coste total de enlace dependiendo de los pesos de la función de coste

Estrechamente relacionada con la función de coste, se ha desarrollado una función que permite establecer un orden de prioridad entre los nodos con capacidad de regeneración para cada petición constituida por un par origen-destino. En el apartado siguiente se detallan los criterios considerados en dicha función.

4.5 Establecimiento de prioridad entre nodos con capacidad de regeneración

Se ha diseñado una función en Matlab, denominada “*carga_nodos_con_regeneradores*”, que permite que el algoritmo IABR-FFWA disponga de la información de prioridad de utilización de los nodos con capacidad de regeneración, para cada par origen-destino de petición posible.

En el simulador realizado se obtiene dicha información en tiempo real para cada petición que llega a la malla. Sin embargo, para una implementación real conviene que se ejecute la función “*carga_nodos_con_regeneradores*” de forma previa u “*off-line*” para su posterior uso en tiempo real. En tal caso la información obtenida se almacena en base de datos.

A continuación se explican las propuestas consideradas para el diseño de la función “*carga_nodos_con_regeneradores*”.

Prioridad según la distancia total de transmisión

La primera propuesta realizada prioriza los nodos con capacidad de regeneración, en función de la distancia total que tendría que recorrer un “*lightpath*” desde el nodo origen al regenerador y desde el regenerador al nodo destino. De esta forma, se favorece el establecimiento de “*lightpaths*” de menor distancia total. La motivación de esta estrategia se apoya en la idea de que caminos de menor distancia se presuponen con mayor OSNR, garantizando la viabilidad física de los “*lightpaths*”.

Tras el diseño de esta propuesta se observó que en algunos casos, no proporcionaba un orden de prioridad conveniente. Por ejemplo, en el caso de que el regenerador estuviera muy cerca del nodo origen y sin embargo lejos del nodo destino. En este caso, se cumplen las restricciones físicas desde el nodo origen al regenerador, pero podrían no cumplirse desde el regenerador al nodo destino, por exceder el número de vanos permitidos. Un caso similar es aquel en el que el regenerador está muy cerca del nodo destino pero lejos del nodo origen, incumpléndose las restricciones físicas en el primer tramo en este caso.

Prioridad según la distancia de los tramos de transmisión

Como respuesta a las deficiencias de la técnica de establecimiento de prioridad según la distancia total de transmisión se diseña una nueva estrategia para el establecimiento de prioridad entre los nodos con capacidad de regeneración.

La estrategia de prioridad según la distancia de los tramos de transmisión garantiza que cada uno de los tramos que constituyen el camino, desde el nodo origen al nodo con

capacidad de regeneración, y desde éste al nodo destino, se encuentran dentro del alcance. En caso contrario releva dichos nodos a posiciones de baja prioridad.

Se ha comprobado en simulación, que disminuyendo la prioridad de los nodos con capacidad de regeneración según criterios de la distancia de los tramos, mejoran las prestaciones de red, en concreto, la petición de primer bloqueo se retrasa al garantizarse la viabilidad física del camino en dos tramos calculado.

En el apartado siguiente se presenta un ejemplo de funcionamiento del algoritmo presentado.

4.6 Funcionamiento del algoritmo IABR-FFWA

En las Ilustraciones 34 a 40 se muestra un ejemplo sencillo del funcionamiento del algoritmo IABR-FFWA. Se presenta una red troncal constituida por 8 nodos numerados desde N1 a N8 y 9 enlaces nombrados como N1_N2, N2_N3, etc.

La red se considera vacía por lo que solamente tiene impacto en la función de coste IABR-FFWA el coste debido a OSNR. Dicho de otra manera, se considera un “*peso debido a pérdida de OSNR*” igual a 1 y un “*peso debido a carga de enlace*” igual a 0.

Se considera la llegada de una única petición a la red troncal, que tiene como origen el nodo N1 y como destino el nodo N5.

Se asume un formato de modulación DQPSK que para tasa de transmisión de 40 Gbps requiere de los siguientes umbrales de OSNR y PMD:

- La OSNR mínima ha de ser de mayor de 12.5 (dB).
- La PMD máxima no debe superar los 6 (ps).

En la Ilustración 34 se presenta una topología de red ejemplo con las distancias de los enlaces expresadas en kilómetros. Se considera que el nodo N7 dispone de capacidad de regeneración lo que permite aumentar el alcance.

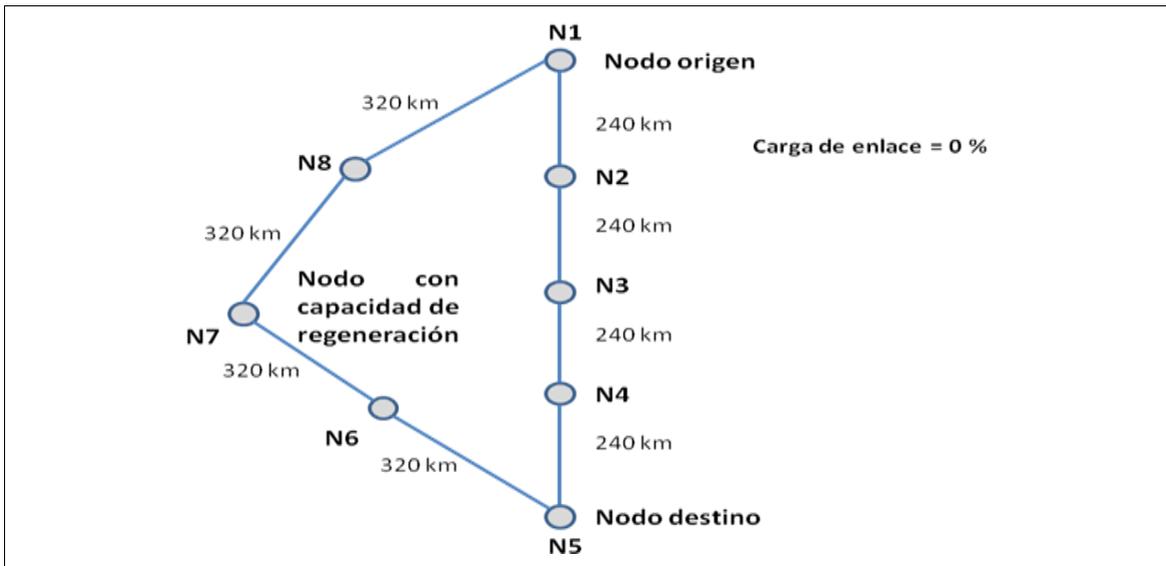


Ilustración 34: Topología de red ejemplo

En la Ilustración 35 se presenta el coste de los enlaces de la red de acuerdo con la función de coste IABR-FFWA.

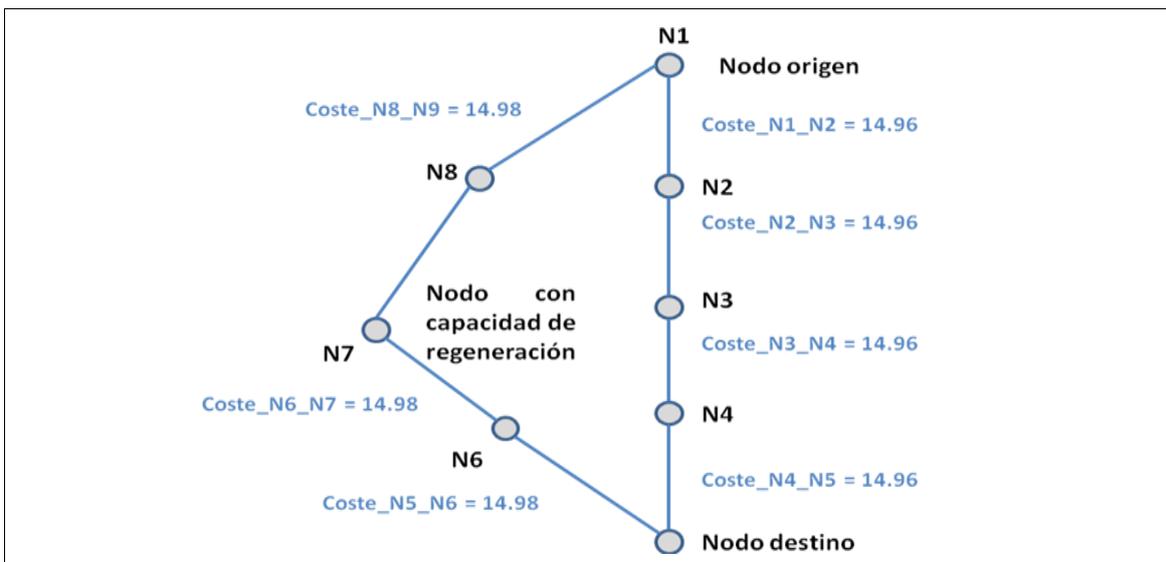


Ilustración 35: Coste de los enlaces de red ejemplo

En la Ilustración 36 se representa el resultado del cómputo de caminos en un tramo mediante la etapa base del algoritmo IABR-FFWA. Se recuerda que la etapa base es un algoritmo “*k*-CSP”.

Para el ejemplo concreto se calculan (“*k*”) igual a 2 caminos de menor coste desde el nodo origen N1 al nodo destino N5. En la Ilustración 36 se representa el camino de menor coste en color azul, que atraviesa los nodos N1-N2-N3-N4-N5. El segundo camino de menor coste se representa en color verde como la ruta N1-N8-N7-N6-N5.

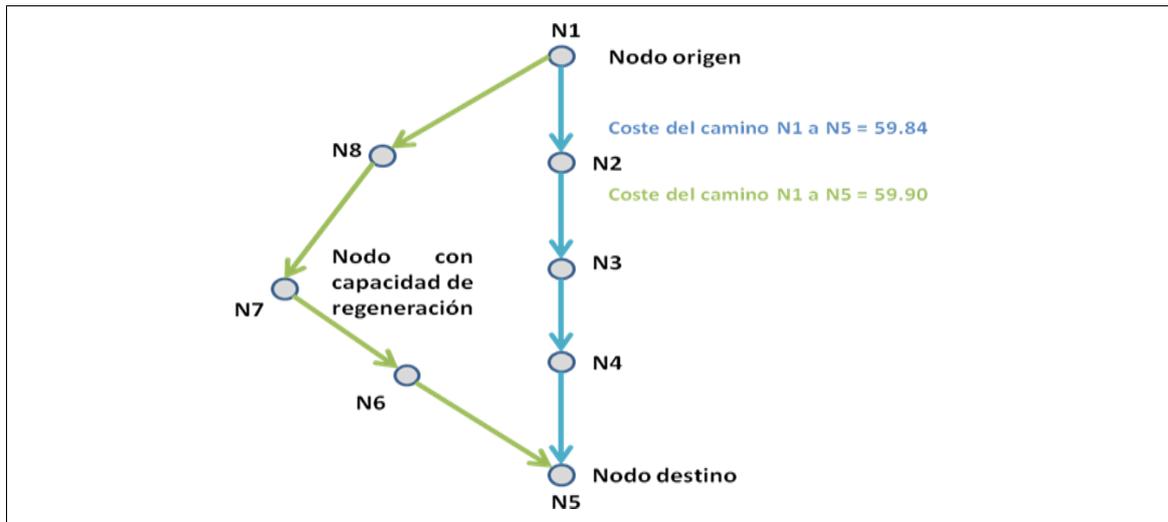


Ilustración 36: Coste de los caminos calculados mediante la etapa base IABR-FFWA

La Ilustración 37 corresponde con la validación de restricciones físicas del camino de menor coste, (representado en color verde), que se realiza de la siguiente manera:

- Se calcula la OSNR y PMD de los caminos en función del número de vanos del mismo.
- Se establecen umbrales de OSNR y PMD de acuerdo al formato de modulación y tasa de transmisión.
- Se valida el camino de menor coste de acuerdo a los parámetros de OSNR y PMD de los enlaces y a los umbrales establecidos para estos parámetros.

Como resultado de dicha validación se considera el camino de menor coste N1-N2-N3-N4 no viable físicamente y se descarta.

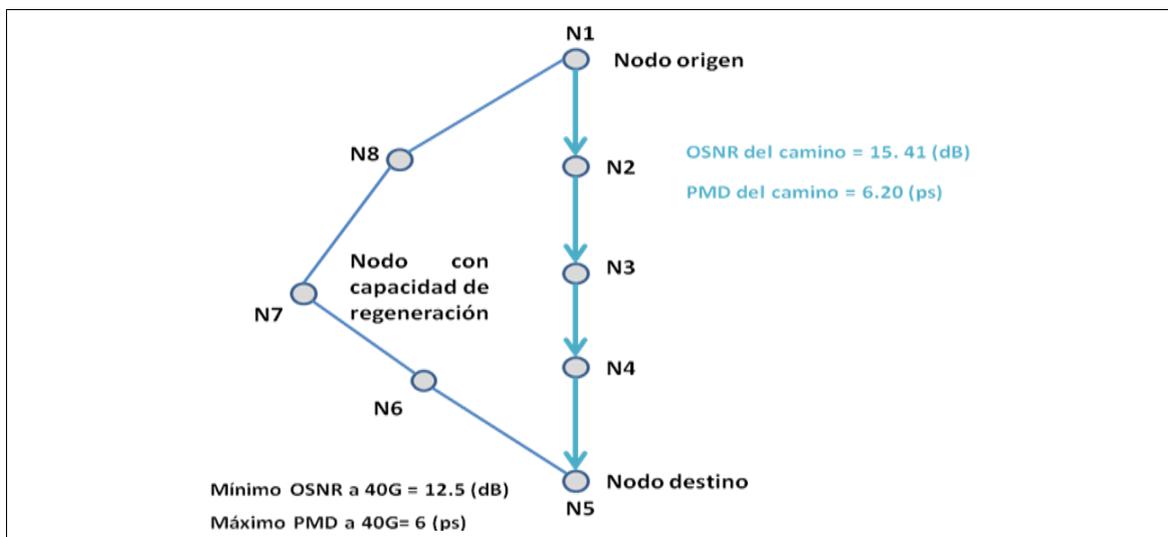


Ilustración 37: Selección del camino de menor coste

Puesto que el camino de menor coste no cumple los requisitos físicos se comprueba la viabilidad del segundo camino computado mediante la etapa base IABR-FFWA. En la Ilustración 38 se determina la viabilidad física del camino N1-N8-N7-N6-N5, (representado en color verde), de acuerdo al procedimiento de validación descrito.

Mediante el proceso de validación se determina que el segundo camino de menor coste no es viable físicamente y se descarta.

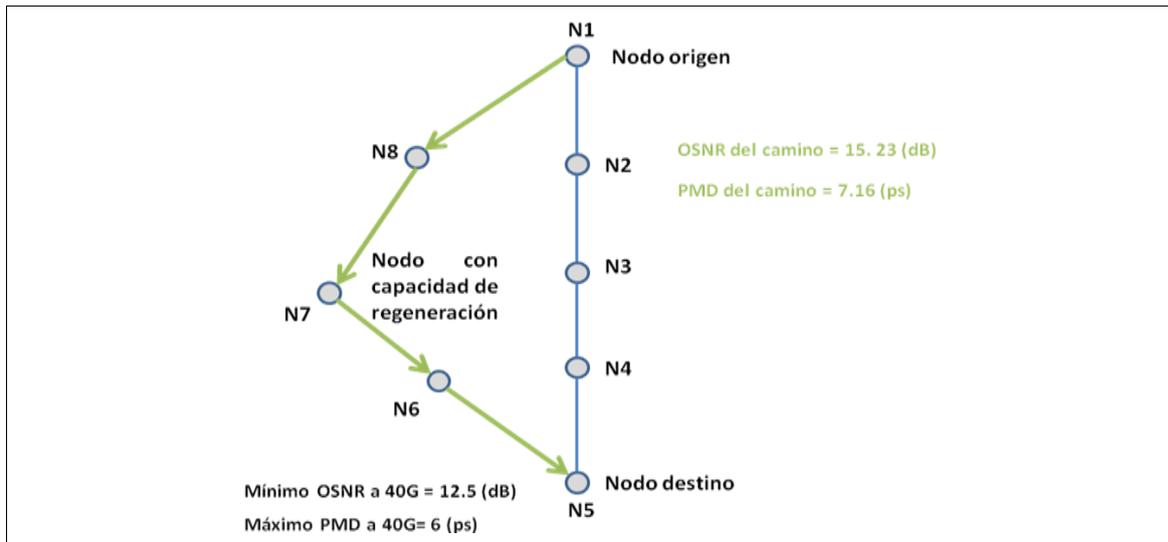


Ilustración 38: Selección del segundo camino de menor coste

En el caso de que alguno de los (“k”) caminos calculados en la etapa base del algoritmo IABR-FFWA sea viable físicamente se procede a la tarea de asignación de una longitud de onda para dicho camino y a la reserva de un “*lightpath*”.

De acuerdo al ejemplo descrito, ninguno de los caminos calculados cumple las restricciones físicas, establecidas mediante umbrales de OSNR mínima y PMD máxima. Por lo tanto, se procede a ejecutar la fase avanzada del algoritmo IABR-FFWA evitando que la petición sea descartada.

La estrategia de la etapa avanzada del algoritmo IABR-FFWA consiste en salvar las restricciones físicas mediante el empleo de algún nodo con capacidad de regeneración presente en la red. Se calcula el camino de menor coste desde el nodo origen al regenerador más cercano. Y si se cumplen las restricciones físicas de este primer tramo, se validan la OSNR y PMD desde el nodo con capacidad de regeneración al nodo destino.

Como puede observarse en la Ilustración 39 ambos tramos calculados cumplen los criterios necesarios para el tipo de modulación y velocidad de transmisión, por lo tanto son caminos viables físicamente.

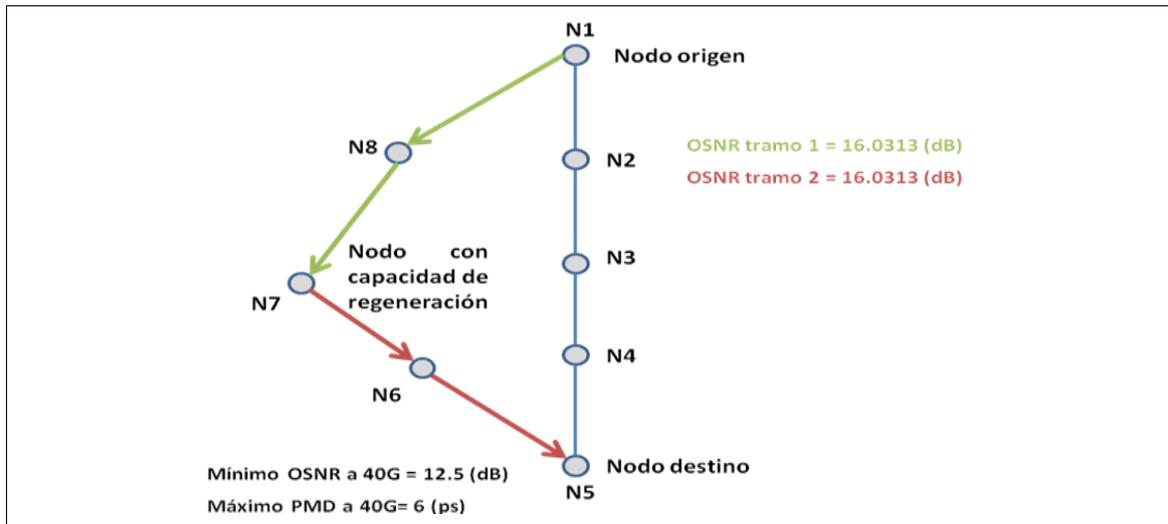


Ilustración 39: Ejecución de la etapa avanzada en dos tramos

En la Ilustración 40 se realiza la asignación de longitud de onda mediante la técnica “*First-Fit*”. La longitud de onda asignada es (λ_1) puesto que la red está vacía.

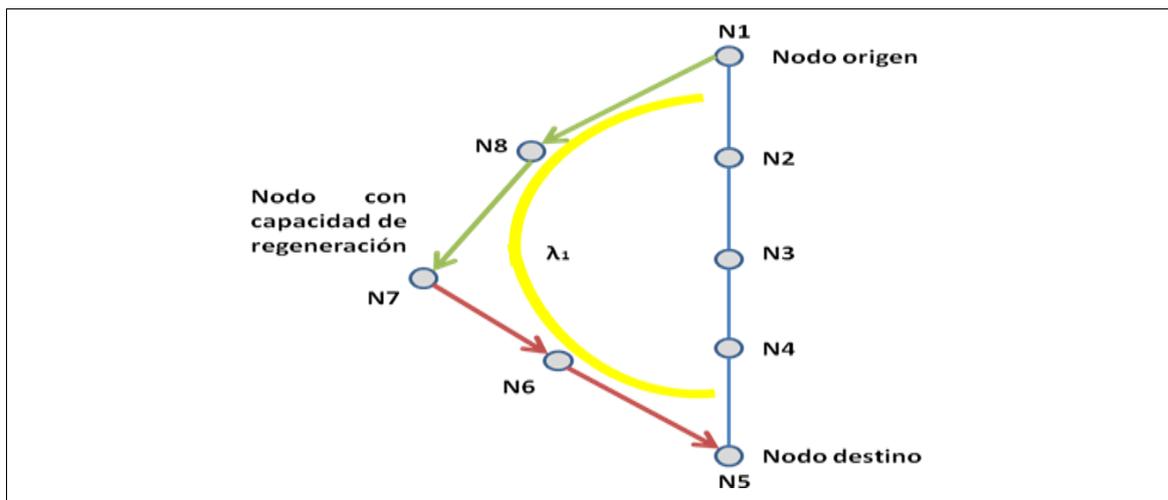


Ilustración 40: Establecimiento de un “lightpath” mediante la etapa avanzada IABR-FFWA

CAPÍTULO V

5. Simulación de algoritmos DRWA

5.1 Topologías de red

El algoritmo (“*Impairment Aware Based Routing – First-Fit Wavelength Assignment*”, IABR-FFWA) propuesto para un núcleo de red fotónica funciona para cualquier topología de red y matriz de tráfico. Como ya se apuntaba en capítulos anteriores una topología de red adecuada ha de ser mallada para favorecer la conectividad entre los nodos. Para el estudio algorítmico en este proyecto se consideran las siguientes topologías malladas de referencia:

- La red de 14 nodos y 21 enlaces NSFNET, presente en la referencia [106].
- La red de 15 nodos y 21 enlaces Pacific Bell, obtenida de la referencia [107].

En las simulaciones en las que se considera el impacto de los efectos físicos, se escalan las distancias de red; en el caso de la NSFNET las distancias reales se escalan por un factor $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{6}$, mientras que en el caso de la red Pacific Bell las distancias reales se escalan por un factor 2. Se considera en ambos escenarios una sola fibra por enlace.

Presentamos la topología NSFNET en las Ilustraciones 41 a 43 con distintos factores de escala en la distancia de sus enlaces:

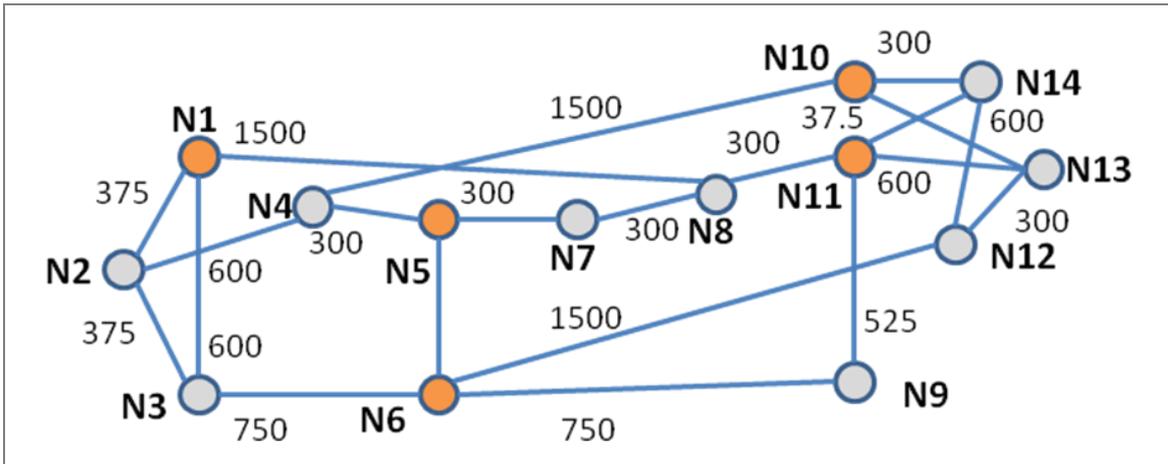


Ilustración 41: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{2}$

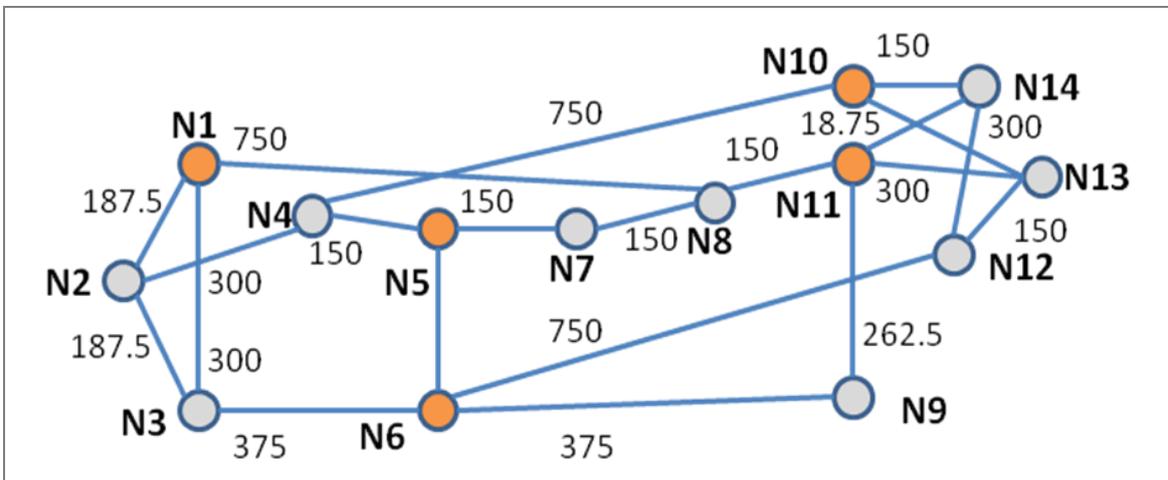


Ilustración 42: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{4}$

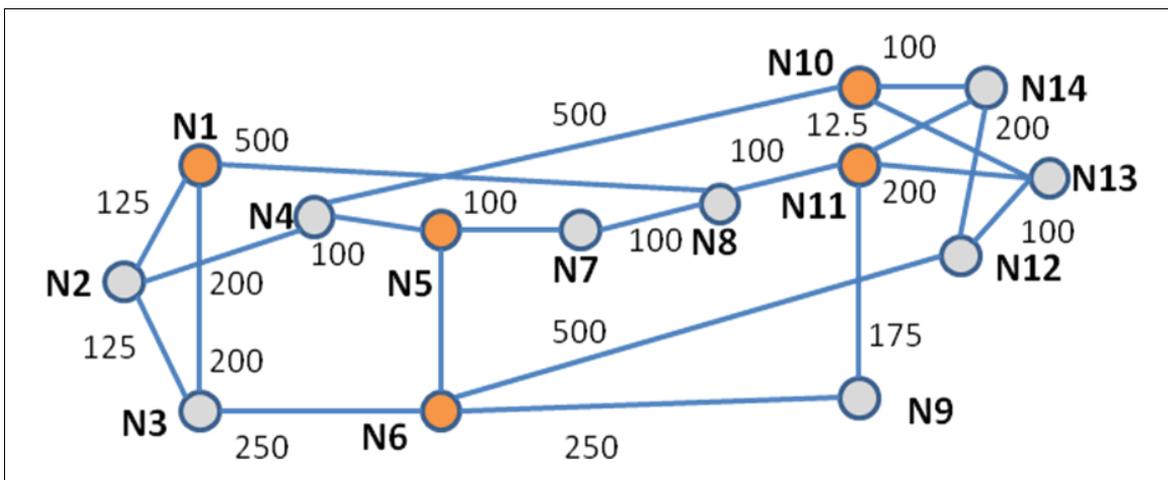


Ilustración 43: Topología NSFNET con distancias escaladas por un factor $\frac{1}{6}$

Presentamos la topología de 15 nodos y 21 enlaces Pacific Bell en la Ilustración 42:

- ROADMs intermedios para la adición y sustracción de canales, cuyo impacto se considera despreciable.
- La topología de red está dotada de regeneradores dispersos en nodos estratégicos.

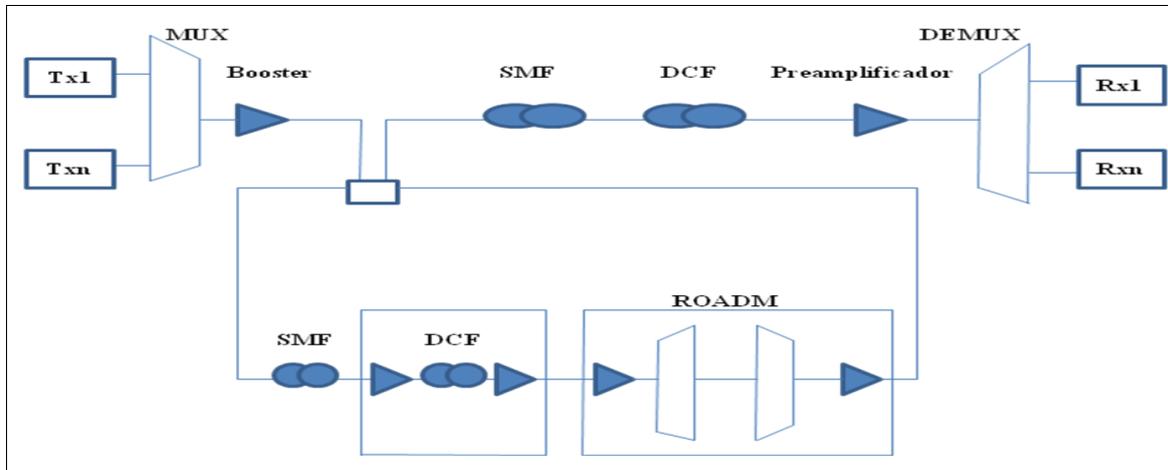


Ilustración 45: Modelo de enlace con ROADMs intermedios

Cuando un enlace tiene una distancia de más de 80 km, se añaden secciones que requieren amplificación “*in-line*” para mantener el nivel de potencia de la señal. Los amplificadores están dotados de control automático de ganancia (“*Gain Automatic Control*”, GAC) para mantener constante la potencia de cada canal. Las secciones adicionales pueden observarse en la parte inferior del modelo de enlace.

El tipo de amplificadores simulados son EDFA. El modelo de enlace presentado y la longitud de los vanos son los adecuados para este tipo de amplificadores. Los amplificadores EDFA son los más utilizados en comunicaciones ópticas, ya que están presentes en todos los despliegues de red WDM a lo largo de la historia.

Para los próximos despliegues de red óptica es razonable reutilizar los equipos ya desplegados, (tipo de fibra y amplificadores), por lo que es previsible la utilización de amplificadores EDFA. El modelo de enlace simulado no incluye ROADMs intermedios.

Las características de transmisión de los elementos simulados en un enlace son los siguientes:

- La potencia de salida por canal del “*booster*” se fija a 2 (dBm) para evitar saturación del resto de amplificadores. El “*booster*” tiene una ganancia (G) de 16 (dB) y una figura de ruido (F) de 5 (dB).
- Tanto el multiplexor como el demultiplexor tienen pérdidas de 3 (dB) cada uno.
- Los amplificadores “*in-line*” tienen una ganancia (G) de 18 (dB) y una figura de ruido (F) de 5 (dB).
- La fibra SMF tiene un factor de atenuación de $\alpha = 0.35$ (dB/km), mientras que para la fibra DCF el factor de atenuación es de $\alpha = 0.5$ (dB/km).

- El impacto de ROADMs intermedios se ha considerado despreciable mediante tecnología de filtrado LCOS.

5.3 Simulación de peticiones incrementales

El simulador implementado está dotado de las estructuras necesarias para reproducir cualquier distribución del tiempo entre llegadas. Cuando se simula el tiempo entre llegadas de peticiones dinámicas lo habitual es emplear para ello una distribución de Poisson.

Sin embargo, en este proyecto se simulan peticiones incrementales. Esto significa que el conjunto de peticiones ordenadas efectúan su llegada presentándose al motor de simulación una a una, y se gestionan con independencia de las peticiones venideras. Una vez se establecen los “*lighpaths*” se mantienen a lo largo de todo el tiempo de simulación.

Considerando que no se producen caídas de los enlaces o equipos de red y que el tipo de peticiones es incremental, se sustituye la variable tiempo por una ordenación aleatoria del conjunto de peticiones.

El orden de llegada influye considerablemente en el establecimiento del “*lightpath*” pertinente o el rechazo de petición, incluso en la ruta física y longitud de onda seleccionados en el caso de su procesado. Así mismo, el orden de llegada tiene un impacto en el estado de red en cada iteración.

El conjunto de pares origen-destino se obtiene mediante distribución uniforme. El conjunto de la demanda será idéntico en todas las simulaciones de 550 peticiones propuestas en los casos de estudio.

El simulador conserva en modo residual las estructuras de simulación de eventos, tiempo entre llegadas, tiempo de servicio, caídas de enlaces o nodos, recuperaciones de los mismos, etc.

Toma de estadísticos de salida

Para la obtención de datos estadísticos de las prestaciones de red, se realizan (“N”) simulaciones para cada caso de simulación.

Cada una de las (“N”) simulaciones recibe un orden de llegada de peticiones distinto, determinado por una ordenación aleatoria de las peticiones. Dicha ordenación se implementa mediante un generador aleatorio de Matlab; variando la semilla del generador aleatorio se consigue una ordenación aleatoria distinta para cada una de las (“N”) simulaciones.

Mediante (“N”) igual a 100 simulaciones sobre cada caso de estudio se obtienen estadísticos más fiables, conocida la relevancia del orden de llegada de peticiones incrementales.

5.4 Cálculo de OSNR y PMD por el simulador

Los parámetros de ganancias y pérdidas en el enlace descritos están equilibrados y se autocancelan. Por lo tanto, no se produce pérdida de potencia en el enlace. A continuación se presenta la formulación a este respecto:

- La ganancia del tramo final del enlace está equilibrada.

$$-L_{SMF} - L_{DCF} + G_{Preamplificador} = 0$$

- La ganancia de cada vano de fibra está equilibrada.

$$-L_{SMF} + G_{A2} - L_{DCF} + G_{A3} = 0$$

- Por lo tanto la potencia de señal a la salida del preamplificador es la misma potencia de señal que a la salida del Booster.

$$P_{Señal\ salida\ Preamplificador} = P_{Señal\ salida\ Booster}$$

- La potencia de emisión espontánea generada en un amplificador es la siguiente:

$$P_{ASE\ Generado} = h * B_0 * f_{central} * f * (g - 1)$$

Donde:

$$h = 6.620689 \text{ (J/S)}. \text{ La constante de Planck.}$$

$$f_{central} = 193.1 \times 10^{12} \text{ (Hz)}. \text{ La frecuencia central del lightpath.}$$

- La potencia de ruido a la salida del preamplificador puede obtenerse como indica la fórmula a continuación:

$$\begin{aligned} P_{ASE\ Salida\ Preamplificador} \\ = P_{ASE\ Generado\ booster} + (2 * P_{ASE\ DCF}) * (N_{VANOS} - 1) \\ + P_{ASE\ Generado\ Preamplificador} \end{aligned}$$

- La OSNR a la salida del camino puede calcularse de la siguiente manera:

$$OSNR_{Final\ del\ camino} = \frac{P_{Señal\ salida\ Preamplificador}}{P_{ASE\ Salida\ Preamplificador}}$$

- El simulador calcula la OSNR dependiendo del número de vanos del camino y de acuerdo a la formulación descrita, para posteriormente comprobar el cumplimiento de un umbral de OSNR mínimo que garantice la viabilidad física del “*lightpath*” que se desea establecer.
- Además de comprobar la viabilidad respecto a la OSNR se calcula la PMD acumulada a lo largo del camino de la siguiente manera:

$$DGD = D_{PMD} * \sqrt{L} (ps)$$

5.5 Descripción del simulador

Se desarrolla un simulador bajo entorno Windows que utiliza Matlab como motor y máquina computacional. Pueden identificarse en la Ilustración 46 las entradas y salidas fundamentales del simulador, así como el proceso que realiza.

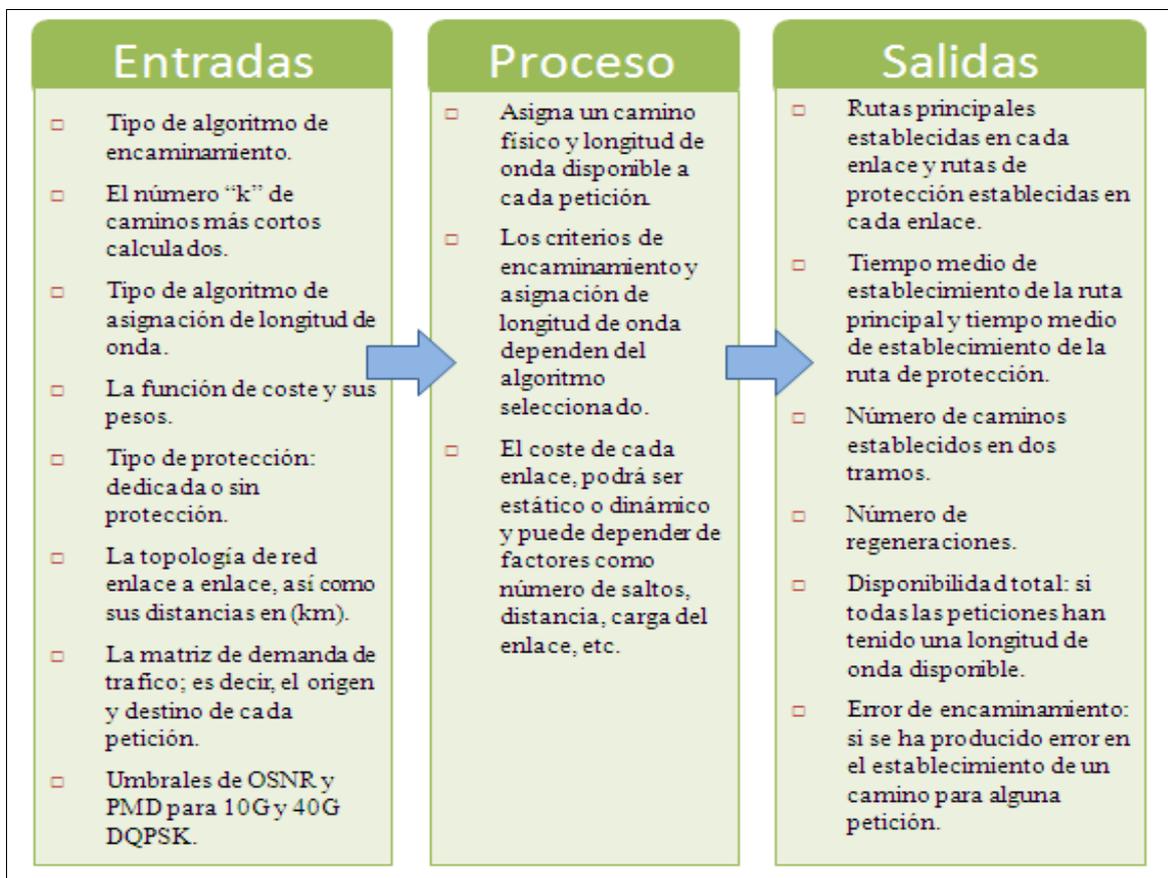


Ilustración 46: Descripción del simulador

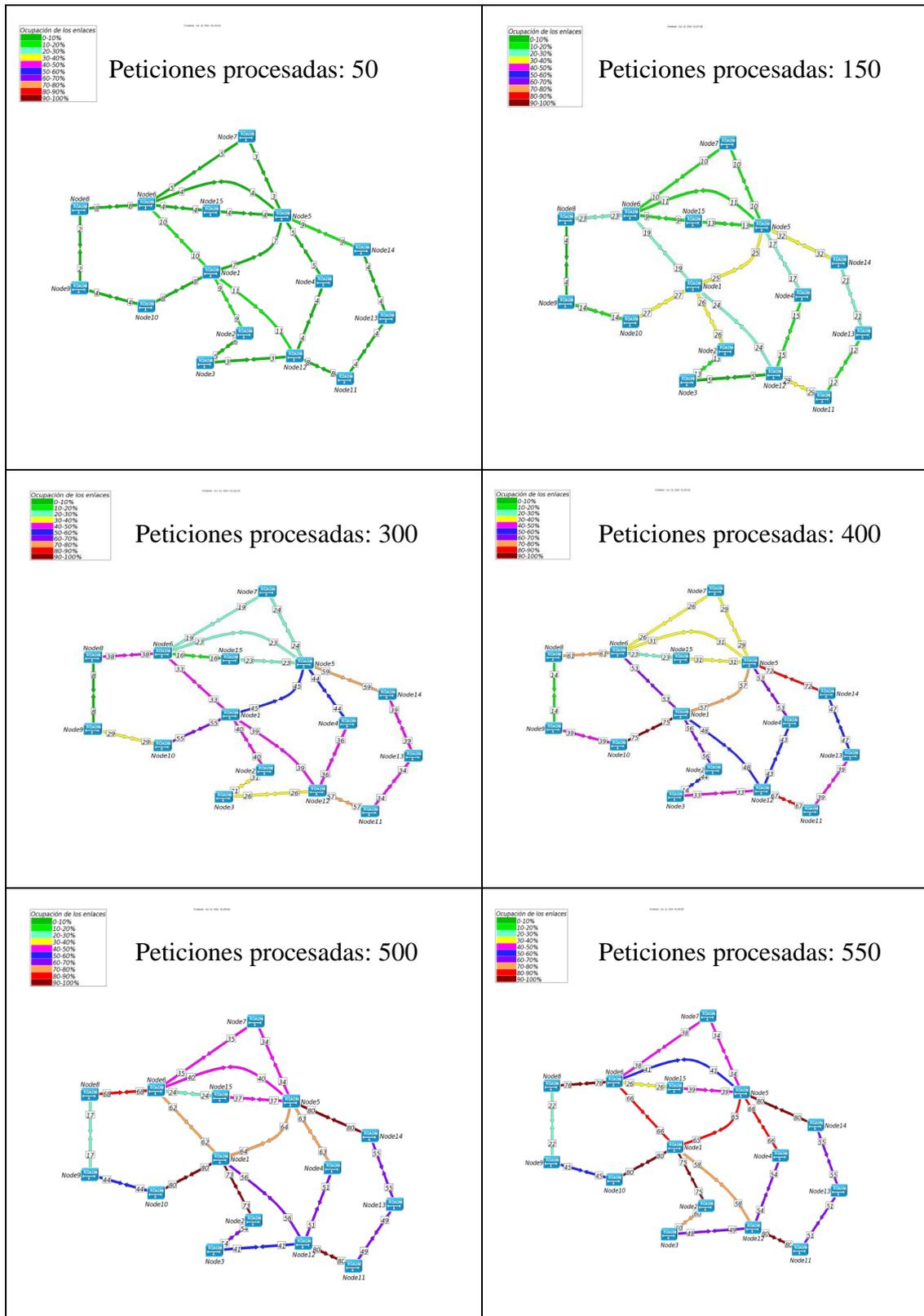


Ilustración 47: Aplicación del algoritmo IABR-FFWA mediante Weathermap en la red Pacific Bell escalada por un factor 2, a 40 Gbps – DQPSK

El simulador se ha utilizado fundamentalmente como apoyo al diseño del algoritmo IABR-FFWA. Sin embargo, está preparado para la simulación de cualquier tipo de algoritmo DRWA.

El simulador está constituido por una serie de funciones implementadas en lenguaje Matlab, y mediante las cuales se consigue la funcionalidad esperada. Dichas funciones se describen en el Apéndice del presente documento.

Tras la obtención de la información de salida del simulador, se emplea un programa denominado Weathermap que provee de la representación gráfica del funcionamiento del algoritmo IABR-FFWA sobre la topología seleccionada.

Mediante la representación de la carga de los enlaces de la red tras la gestión de la misma de un conjunto incremental de peticiones es posible observar la progresión en el llenado de los enlaces, como muestra la Ilustración 47.

Además mediante la herramienta Weathermap es posible representar la información de estado de los enlaces, obtenida dicha información como salida del simulador:

- El canal de transmisión de cada circuito establecido.
- La longitud de onda central de cada canal (configurable el número total de canales).
- El número de cada circuito establecido a través del enlace.
- El origen y destino del circuito establecido a través del enlace.
- El número de canales ocupados en dicho enlace.
- La máxima longitud de onda ocupada en el enlace.

En la Tabla 29 se presenta un ejemplo de información tal cual es representada mediante Weathermap:

Lambdas en uso: 80, Lambda máxima en uso: 80

Canal (Longitud de onda)	Lightpath
1 (1520 nm)	Circuito id 3 node14 -node7
2 (1521 nm)	Circuito id 9 node13 -node6
3 (1522 nm)	Circuito id 13 node12 -node14
4 (1523 nm)	Circuito id 16 node5 -node11
5 (1524 nm)	Circuito id 24 node14 -node15
6 (1525 nm)	Circuito id 47 node7 -node11

7 (1526 nm)	Circuito id 31 node8 -node13
8 (1527 nm)	Circuito id 43 node1 -node14
9 (1528 nm)	Circuito id 38 node14 -node2
10 (1529 nm)	Circuito id 60 node5 -node13
11 (1530 nm)	Circuito id 63 node4 -node14
12 (1531 nm)	Circuito id 69 node14 -node4
13 (1532 nm)	Circuito id 61 node13 -node1
14 (1533 nm)	Circuito id 70 node14 -node6
15 (1534 nm)	Circuito id 72 node5 -node14
16 (1535 nm)	Circuito id 84 node13 -node7
17 (1536 nm)	Circuito id 94 node7 -node13
18 (1537 nm)	Circuito id 89 node13 -node8
19 (1538 nm)	Circuito id 99 node11 -node5
20 (1539 nm)	Circuito id 104 node14 -node4
21 (1540 nm)	Circuito id 102 node10 -node14
22 (1541 nm)	Circuito id 105 node13 -node8
23 (1542 nm)	Circuito id 113 node10 -node14
24 (1543 nm)	Circuito id 121 node14 -node9
25 (1544 nm)	Circuito id 127 node13 -node8
26 (1545 nm)	Circuito id 129 node7 -node11
27 (1546 nm)	Circuito id 134 node15 -node13

Tabla 29: Fragmento del estado del enlace node5-node14

5.6 Casos de estudio en tiempo real considerando bonanza de los “lightpaths”

El objetivo de este apartado es extraer conclusiones que nos permitan mejorar las prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre topologías malladas adecuadas para un núcleo de red.

Todas las simulaciones se realizan en tiempo real, con una demanda de tráfico no conocida de forma previa y sobre las topologías de red NSFNET y Pacific Bell. Los pares de nodos origen-destino que constituyen la demanda se distribuyen uniformemente. La demanda está constituida por 550 pares de nodos, ordenados aleatoriamente en cada simulación. El algoritmo IABR-FFWA se evalúa sobre los escenarios presentados bajo varios factores de escala.

En la Tabla 30 se presentan los criterios del análisis estadístico que se han tomado en todos los apartados presentados más adelante:

Criterios del análisis de simulación realizado	
N	100
I confianza	95%
Alfa	5%
t(n-1,alfa/2)	1,984217

Tabla 30: Criterios del análisis estadístico de simulación

Se realizan 100 simulaciones variando la semilla aleatoria que ordena las demandas, de modo que se obtengan valores medios más fiables. Cada simulación consta de una demanda de 550 peticiones de circuitos. No se reservan caminos de protección salvo que se indique lo contrario.

5.6.1 Impacto del parámetro ("k")

Sobre las topologías de red NSFNET y Pacific Bell, bajo consideración de que todos los "lightpaths" son viables físicamente; es decir, independientemente del formato de modulación y tasa de transmisión, se evalúa el aprovechamiento de los recursos de red variando el valor del parámetro ("k") en el rango [1,8]. Este parámetro determina, en el escenario de simulación presentado, el número de caminos calculados por un algoritmo RWA, con el objetivo de proporcionar un camino válido para el establecimiento de un "lightpath" a través de él.

La función de coste utilizada en este caso de estudio es una función de coste basada en la distancia, en la que el coste por enlace es el número de vanos de 80 (km) que requiere el mismo.

En la Ilustración 48 se observa que al aumentar el número de caminos calculados es posible retrasar el primer bloqueo de petición.

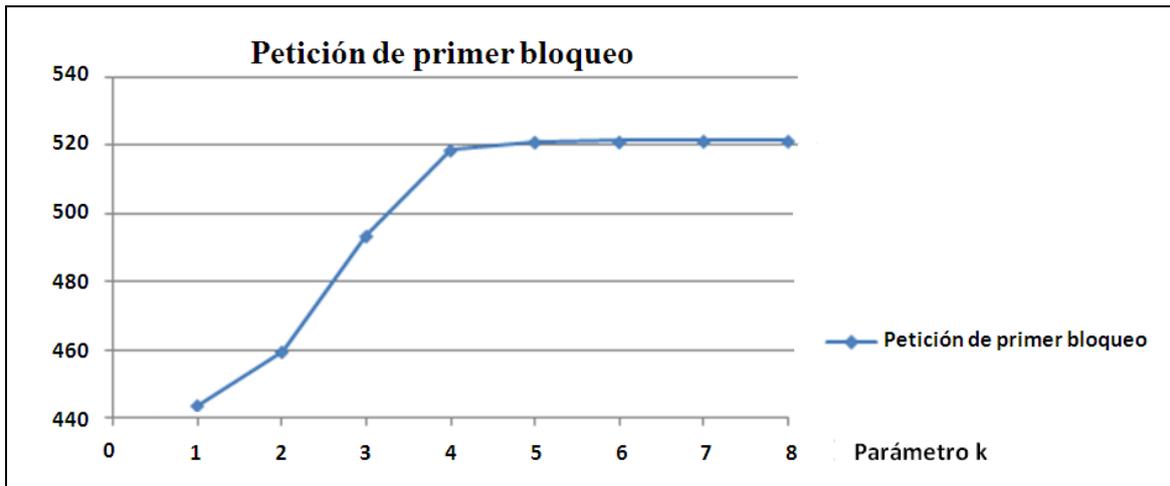


Ilustración 48: Petición de primer bloqueo sobre la topología NSFNET

En la Tabla 31 se presenta el análisis estadístico de los datos correspondientes al primer rechazo de petición para la topología NSFNET sin restricciones físicas, de acuerdo a la Ilustración 48. Mediante “Retraso” se representa el número de peticiones que se retrasa el primer bloqueo de petición al aumentar el factor (“k”) respecto a (“k”) igual a 1. La fila de “Mejora” expresa el valor del “Retraso” en porcentaje con respecto al valor del primer rechazo de petición para (“k”) igual a 1.

Análisis estadístico del primer rechazo de petición para la topología NSFNET sin restricciones físicas								
K	1	2	3	4	5	6	7	8
Media	447.38	459.09	493.25	518.57	520.98	521.05	521.26	521.29
S(x)	20.739	27.555	33.200	12.627	11.055	11.064	11.061	11.072
E ±	4.113	5.468	6.588	2.505	2.194	2.195	2.195	2.197
Retraso	0	11.71	45.87	71.19	73.6	73.67	73.88	73.91
Mejora (%)	0	2.62	10.25	15.91	16.45	16.47	16.51	16.52

Tabla 31: Petición de primer bloqueo en topología NSFNET sin restricciones físicas

La mejora total en el retraso de la primera petición bloqueada para (“k”) igual a 8 respecto a (“k”) igual a 1 es de un 16.5%. Sin embargo, para (“k”) igual a 3 ya se obtiene un 10.3% de mejora.

En la Ilustración 49 se representa el estado de red para el primer bloqueo de petición en la topología NSFNET sin restricciones físicas, en función del factor (“k”).

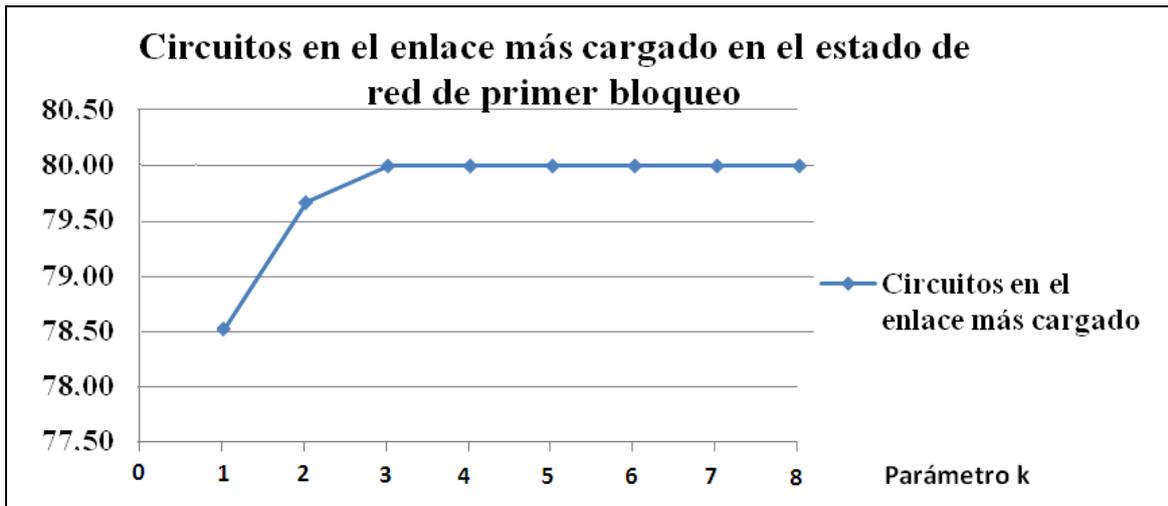


Ilustración 49: Estado de red de primer bloqueo de petición NSFNET de acuerdo al factor ("k")

Se observa una mejora en el aprovechamiento de los recursos del enlace más cargado de la red al incrementar el valor de ("k") desde el valor 1 hasta el 3. Para un valor de ("k") igual a 3 el enlace más cargado ha alcanzado su "llenado".

En la Ilustración 50 observamos que se obtienen resultados similares para la topología Pacific Bell.

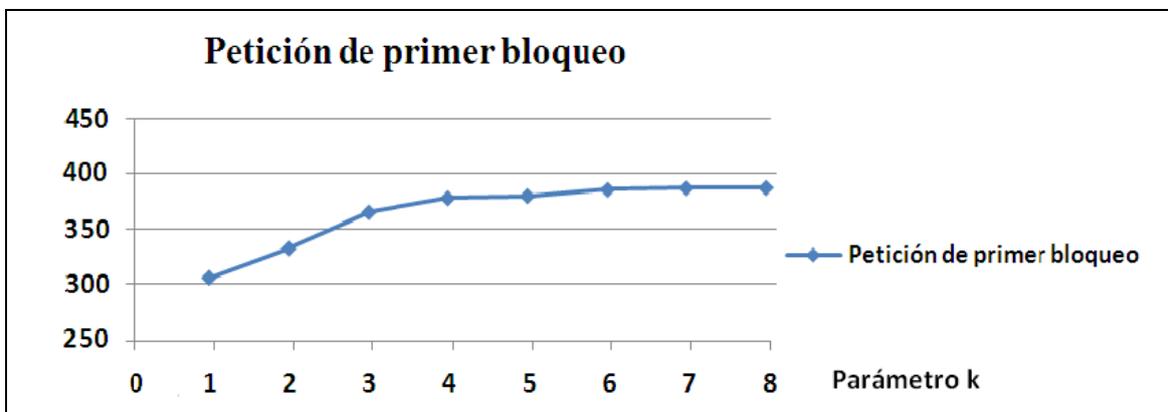


Ilustración 50: Petición de primer bloqueo en la topología Pacific Bell de acuerdo al factor ("k")

En la Tabla 32 se presenta el análisis estadístico de los datos correspondientes a la Ilustración 50. La mejora en el retraso del primer bloqueo de petición para ("k") igual a 3 respecto de ("k") igual a 1 es de un 19.4%, alcanzándose hasta un 26.7% de mejora para ("k") igual a 8.

Análisis estadístico del primer rechazo de petición para la topología Pacific Bell sin restricciones físicas								
K	1	2	3	4	5	6	7	8
Media	306.31	332.98	365.71	378.64	380.57	386.46	387.90	388.16
S(x)	18.434	23.372	23.658	23.349	23.782	21.715	22.826	22.860
E ±	3.658	4.638	4.694	4.633	4.719	4.309	4.529	4.536
Retraso	0	26.67	59.4	72.33	74.26	80.15	81.59	81.85
Mejora (%)	0	8.71	19.39	23.61	24.24	26.17	26.64	26.72

Tabla 32: Retraso de la petición de primer bloqueo en topología Pacific Bell de acuerdo al factor ("k")

Conclusiones

- A partir de cierta carga de red algunos enlaces estarán llenos y por lo tanto no tendrán ninguna longitud de onda disponible. Sin embargo, al calcular ("k") caminos se facilita que alguno de ellos pueda cumplir la restricción de continuidad de longitud de onda evitando el bloqueo de petición.
- Las prestaciones de red mejoran rápidamente al aumentar ("k") entre 1 y 3. Para valores de ("k") mayores de 3 la mejora en las prestaciones de red es menos notoria, lo que unido al mayor retardo derivado del cálculo de más caminos por petición, ratifica la idoneidad de valores de ("k") del orden 3.
- Los resultados del estudio han sido concluyentes independientemente de la topología de red, obteniéndose resultados similares para ambos escenarios.
- Estos resultados pueden extrapolarse para la adecuada configuración del parámetro ("k") en el algoritmo IABR-FFWA propuesto.

5.6.2 Impacto de la protección dedicada

En este apartado se analiza el impacto de la reserva de protección dedicada (1+1) en las prestaciones de red, con el objetivo de determinar la viabilidad de dicha protección.

La protección dedicada consiste en la reserva de caminos secundarios o de protección para cada flujo establecido entre un par origen-destino. Estos caminos reservados han de cumplir la peculiaridad de ser disjuntos en enlaces y nodos al camino principal establecido. Esta es una forma restrictiva de garantizar que el camino principal y

secundario pertenecen a distintos grupos de riesgo de enlaces, (“*Shared Risk Link Group*”, SRLG).

Escenario NSFNET

La Ilustración 51 representa la evolución del llenado de los enlaces a medida que se establecen “*lightpaths*”. Para el algoritmo “*3-Shortest-Path*” sin protección sobre topología NSFNET, el primer bloqueo de petición tiene lugar en la petición 493, cuando el enlace más cargado está lleno sus 80 longitudes de onda están ocupadas.

La línea azul representa valores medios de carga del enlace más cargado de las 100 simulaciones realizadas; mientras que las líneas roja y verde representan valores máximos y mínimos, respectivamente.

La diferencia máxima entre la carga máxima y mínima del enlace más cargado es de 20 peticiones. Estas diferencias proceden de los diferentes estados de red, en función del orden de llegada de las peticiones, para un mismo número de “*lightpaths*” establecidos.

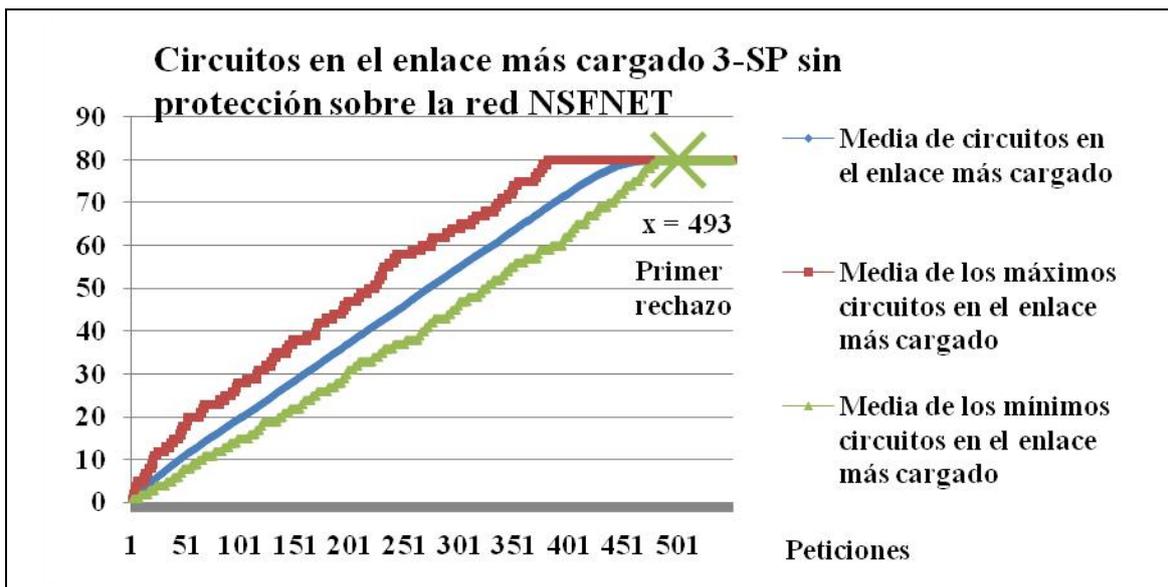


Ilustración 51: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP NSFNET sin protección

En la Tabla 33 se presenta un análisis estadístico del número medio de circuitos en el enlace más cargado, para (“*k*”) igual a 3 en la topología NSFNET con una función de coste basada en distancia, tanto sin protección como con protección (1+1).

N	Media sin protección	S(x) sin protección	E sin protección	Media con protección	S(x) con protección	E con protección
1	1.00	0.00	0.00	1.00	0.000	0.000
10	3.30	0.810	0.161	5.70	0.785	0.156

25	6.36	1.501	0.298	12.20	1.511	0.300
50	11.31	2.168	0.430	22.61	2.098	0.416
75	15.63	2.268	0.450	32.66	2.893	0.574
100	19.95	2.638	0.523	42.58	3.248	0.644
125	24.14	2.875	0.570	52.22	3.891	0.772
150	28.57	3.046	0.604	62.32	4.330	0.859
175	33.06	3.222	0.639	72.12	3.950	0.784
200	37.44	3.082	0.612	78.08	1.862	0.370
225	41.84	3.329	0.661	78.91	1.232	0.244
250	46.09	3.602	0.715	79.09	1.111	0.220
275	50.75	3.846	0.763	79.19	1.080	0.214
300	54.96	3.824	0.759	79.29	0.988	0.196
325	59.28	3.869	0.768	79.46	0.869	0.173
350	63.64	3.873	0.768	79.54	0.809	0.161
375	68.04	3.934	0.781	79.66	0.714	0.142
400	72.20	3.851	0.764	79.73	0.601	0.119
425	76.31	3.299	0.655	79.77	0.566	0.112
450	79.12	1.597	0.317	79.84	0.443	0.088
475	79.97	0.223	0.044	79.90	0.302	0.060
500	80.00	0.000	0.000	79.92	0.273	0.054
550	80.00	0.000	0.000	79.97	0.171	0.034

Tabla 33: Análisis estadístico del número de circuitos en el enlace más cargado para 3-SP NSFNET con función de coste distancia

Véase el impacto sobre el número de circuitos en el enlace más cargado, que tiene lugar al establecer para cada petición dos caminos disjuntos, un camino principal y otro de protección dedicada o (1+1).

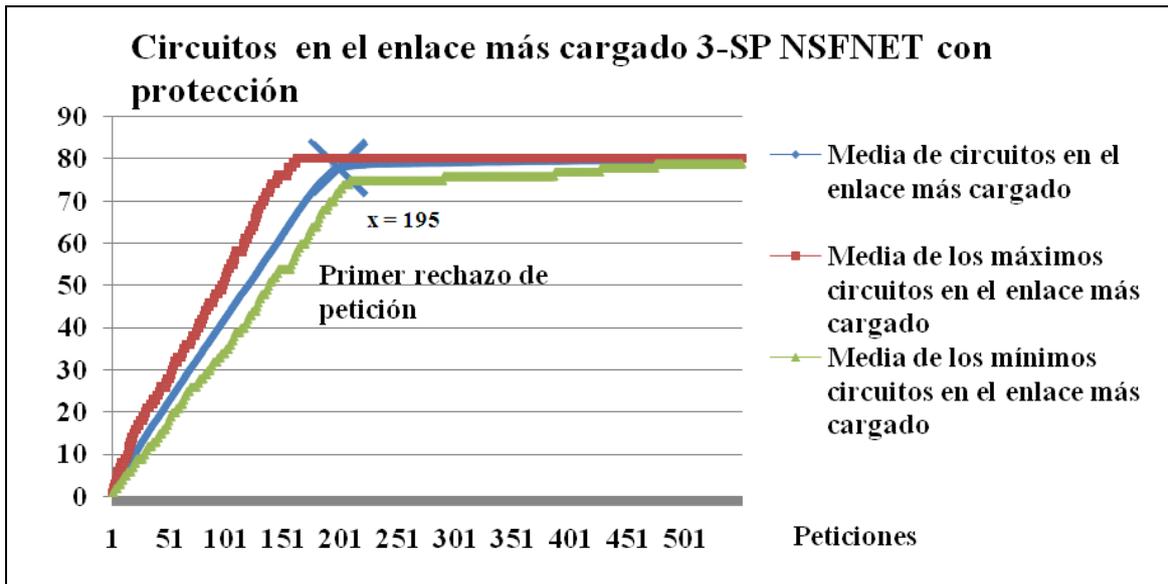


Ilustración 52: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP NSFNET con protección (1+1)

La Ilustración 52 representa la evolución del llenado de los enlaces a medida que se establecen “*lightpaths*”, requiriéndose caminos principales y de protección (1+1).

La comparativa de los datos de las Ilustraciones 51 y 52, así como los de la Tabla 33, permite apreciar que el llenado del enlace más cargado en el caso sin protección, se produce en torno a la petición 450; mientras que cuando hay protección (1+1), el llenado se produce mucho más rápido, en torno a la petición 250. Por consiguiente, casi dos veces más rápido.

Paralelamente, se observa que al incluir protección (1+1) también hay un adelanto en la petición de primer bloqueo, que pasa desde la petición 493.25 a la 195.24, en valores medios. El empeoramiento en prestaciones es por tanto muy significativo, del orden de un 60%.

La diferencia máxima entre la carga del enlace más cargado máxima y mínima de las 100 simulaciones es de unos 25 “*lightpaths*” y se debe a que el orden de llegada de las peticiones, tiene un impacto aún mayor sobre el llenado del enlace más cargado, al requerirse de protección (1+1).

Escenario Pacific Bell

La Ilustración 53 representa el número de circuitos en el enlace más cargado, así como el primer rechazo de petición, para el algoritmo 3-SP sobre la topología Pacific Bell, comparándose los resultados obtenidos en el caso de establecer protección dedicada respecto al caso sin protección.

En el caso de no emplear protección la primera petición bloqueada (valores medios) es la 365.71. Sin embargo, al emplear protección los enlaces se cargan más rápido y el primer rechazo se produce mucho antes, en la petición media 131.8. El empeoramiento en prestaciones respecto a la petición de primer bloqueo es prácticamente de un 64%.

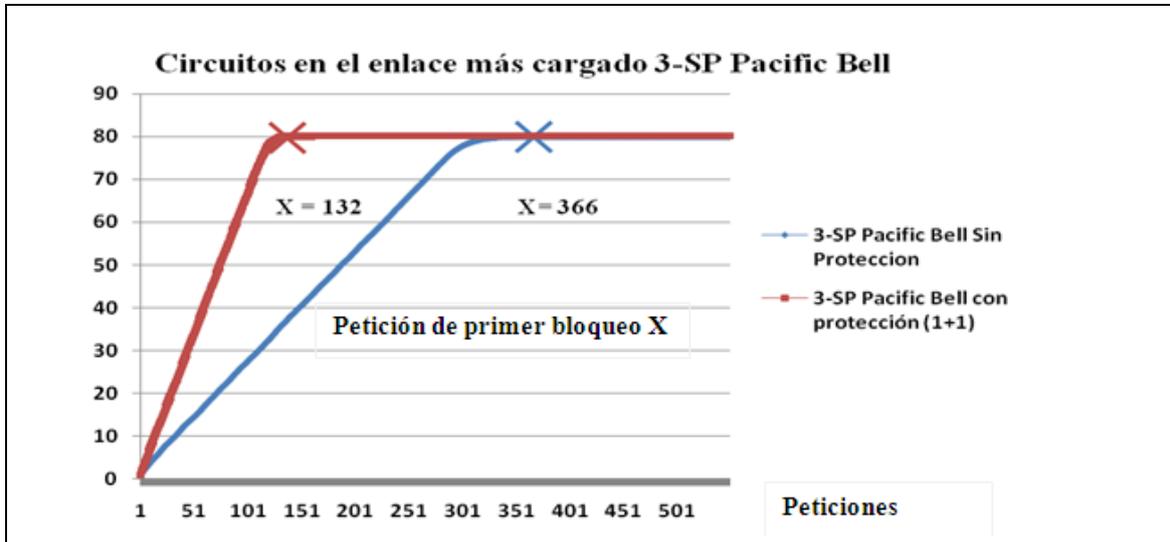


Ilustración 53: Circuitos en el enlace más cargado 3-SP Pacific Bell

En la Tabla 34 se presenta un análisis estadístico del número medio de circuitos en el enlace más cargado para (“k”) igual a 3, sobre la topología Pacific Bell; con una función de coste basada en distancia, tanto sin protección como con protección (1+1).

N	Media de circuitos en enlace más cargado sin protección	S(x) sin protección	E sin protección	Media de circuitos en enlace más cargado con protección	S(x) con protección	E con protección
1	1.00	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000
10	3.91	0.854	0.169	6.16	1.012	0.201
25	8.09	1.676	0.333	13.43	1.991	0.395
50	14.39	2.287	0.454	25.47	3.236	0.642
75	20.94	2.988	0.593	37.04	3.843	0.762
100	27.26	3.410	0.677	48.27	4.301	0.853
125	33.78	3.912	0.776	60.29	4.887	0.970
150	40.34	4.288	0.851	71.77	4.709	0.934
175	46.63	4.492	0.891	78.68	2.482	0.492
200	52.97	4.894	0.971	79.42	1.387	0.275

225	59.28	5.461	1.084	79.61	1.109	0.220
250	65.79	5.188	1.029	79.70	0.980	0.194
275	72.27	4.737	0.940	79.73	0.908	0.180
300	77.69	3.199	0.635	79.79	0.880	0.175
325	79.57	1.373	0.272	79.86	0.569	0.113
350	79.98	0.200	0.040	79.92	0.394	0.078
375	80.00	0.000	0.000	79.94	0.312	0.062
400	80.00	0.000	0.000	79.94	0.312	0.062
425	80.00	0.000	0.000	79.96	0.243	0.048
450	80.00	0.000	0.000	79.97	0.223	0.044
475	80.00	0.000	0.000	79.98	0.141	0.028
500	80.00	0.000	0.000	79.99	0.100	0.020
525	80.00	0.000	0.000	79.99	0.100	0.020
550	80.00	0.000	0.000	79.99	0.100	0.020

Tabla 34: Análisis estadístico de los circuitos en el enlace más cargado Pacific Bell con función de coste distancia

Conclusiones

Los resultados del estudio pueden emplearse para planificar las estrategias de protección más convenientes en cada caso.

El empleo de protección dedicada en todos los flujos de la red troncal es muy costoso en consumo de recursos de red, ya que empeora alrededor de un 60% la petición de primer rechazo de petición.

El establecimiento de protección dedicada podría ser recomendable para flujos específicos, pero no para la totalidad de los “*lightpaths*” establecidos.

5.6.3 Impacto de la función de coste en las prestaciones del algoritmo 3-SP

Este apartado evalúa el impacto de funciones de coste fijo, como el número de saltos o distancia, frente a funciones de coste adaptativas, como la carga de los enlaces, de algoritmos 3-SP sobre distintos aspectos de prestaciones de red.

Para ello se realizan 100 simulaciones para cada caso de simulación, sobre un conjunto de 550 peticiones con la función de coste 3-SP a evaluar. Se considera la viabilidad

física de todos los caminos ópticos calculados sobre las topologías NSFNET y Pacific Bell

En la Ilustración 54 se representa el número de peticiones previas al primer bloqueo para la topología NSFNET con 3-SP, sin restricciones físicas y para distintas funciones de coste.

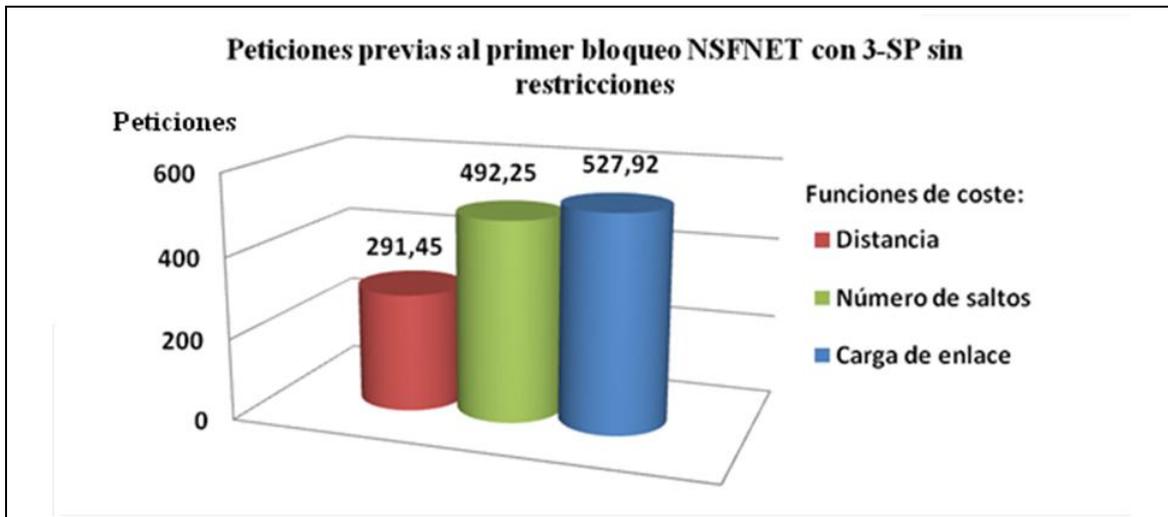


Ilustración 54: Peticiones previas a primer bloqueo para distintas funciones de coste sobre NSFNET

La Ilustración 55 muestra la media de peticiones rechazadas bajo las mismas condiciones que la Ilustración anterior.

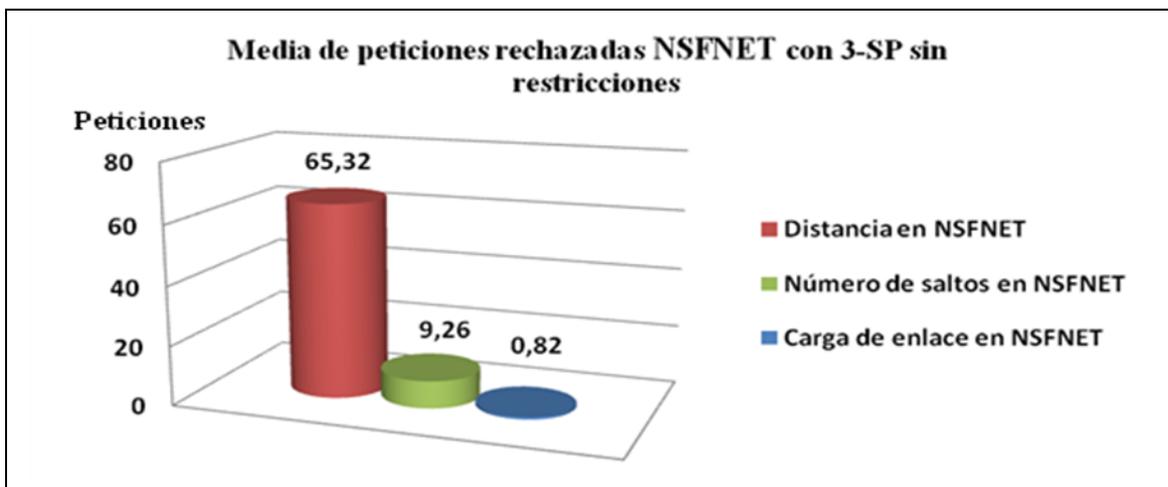


Ilustración 55: Peticiones rechazadas 3-SP NSFNET para distintas funciones de coste

La Ilustración 56 presenta el número medio de circuitos por enlace en el estado final de red tras procesar 550 peticiones.

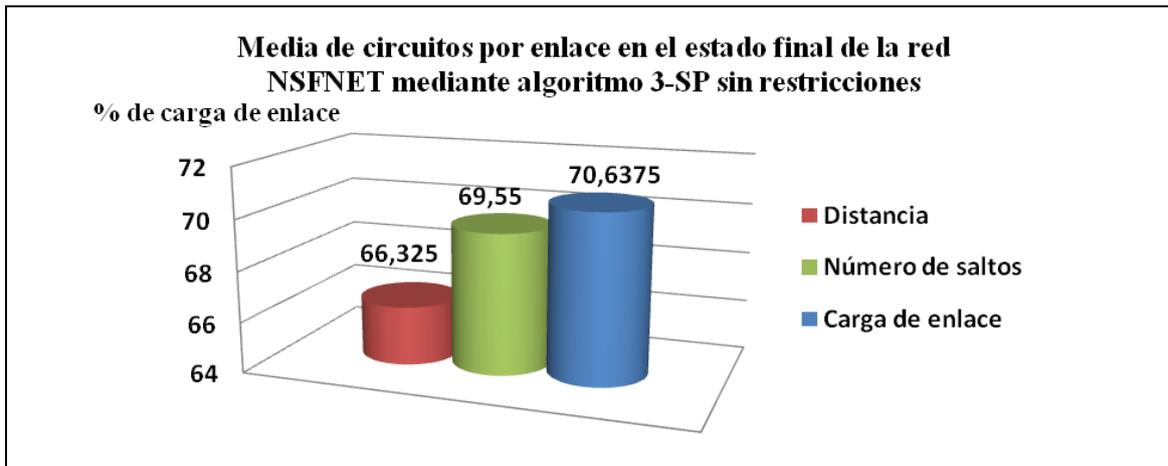


Ilustración 56: Circuitos por enlace en media en el estado final de red NSFNET tras 3-SP

Los resultados obtenidos en las Ilustraciones 54 a 56 indican un mayor aprovechamiento de los recursos, menor probabilidad de bloqueo y retraso de la petición de primer bloqueo para funciones de coste dinámicas que realicen balanceo de carga. Estas mejoras tienen lugar siempre y cuando la viabilidad física de los “*lightpaths*” esté garantizada. En la Tabla 35 se realiza un análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Función de coste	Parámetros	Peticiones previas a primer rechazo	Peticiones rechazadas	Circuitos por enlace en el estado final de red
Distancia	Media	291.45	65.32 / 11.88%	53.06 / 66.33 %
	S(x)	17.381	5.071	0.457
	E ±	3.449	1.006	0.091
Número de saltos	Media	492.25	9.26/ 1.68%	55.64 / 69.55 %
	S(x)	33.200	2.299	0.410
	E ±	6.588	0.456	0.081
Carga de enlace IABR-FFWA	Media	527.92	0.82/ 0.15%	56.51 / 70.63%
	S(x)	27.869	0.857	0.295
	E ±	5.530	0.170	0.058

Tabla 35: Análisis estadísticos NSFNET para distintas funciones de coste

En la Ilustración 57 se recogen los tiempos medios de cálculo por petición del algoritmo 3-SP con distintas funciones de coste. Los resultados ilustrados han de tomarse de

forma cualitativa, debido a la dependencia del motor de simulación. En particular se observa que el tiempo de procesamiento es menor cuando se realiza balanceo de carga.

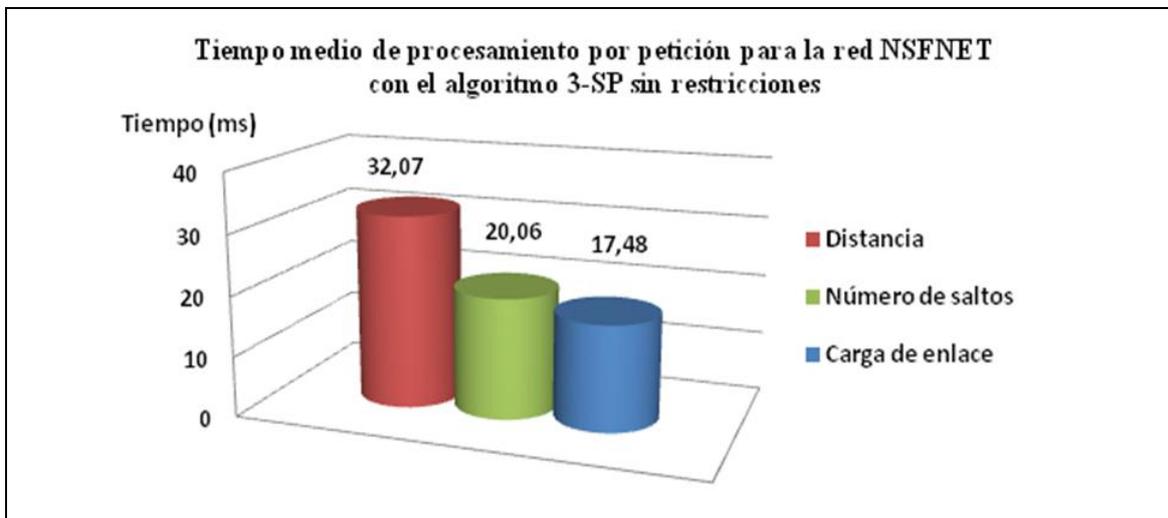


Ilustración 57: Tiempo medio de procesamiento de peticiones NSFNET

De acuerdo a los resultados gráficos en la Tabla 36 se presenta un análisis estadístico del tiempo de procesamiento correspondiente con cada una de las funciones de coste.

Función de coste	Parámetros	Tiempo de procesamiento por petición (ms)
Distancia	Media	32.07
	S(x)	14.911
	E ±	2.959
Número de saltos	Media	20.06
	S(x)	8.009
	E ±	1.589
Carga de enlace IABR-FFWA	Media	17.48
	S(x)	9.685
	E ±	1.922

Tabla 36: Análisis estadístico del tiempo de simulación para topología NSFNET y funciones de coste propuestas

Mediante la función de coste cuyo criterio es la carga de los enlaces, el tiempo de procesado de petición media es inferior en ausencia de restricciones físicas, debido al equilibrado de carga que realiza.

En las Ilustraciones 58, 59 y 60 se representan las peticiones previas al primer rechazo de petición, la media de peticiones rechazadas y la carga media por enlace en el estado final de red Pacific Bell.

Se obtienen resultados conforme a lo explicado en la topología NSFNET, en lo que respecta a las mejoras debidas a un coste basado en equilibrado de la carga de los enlaces.

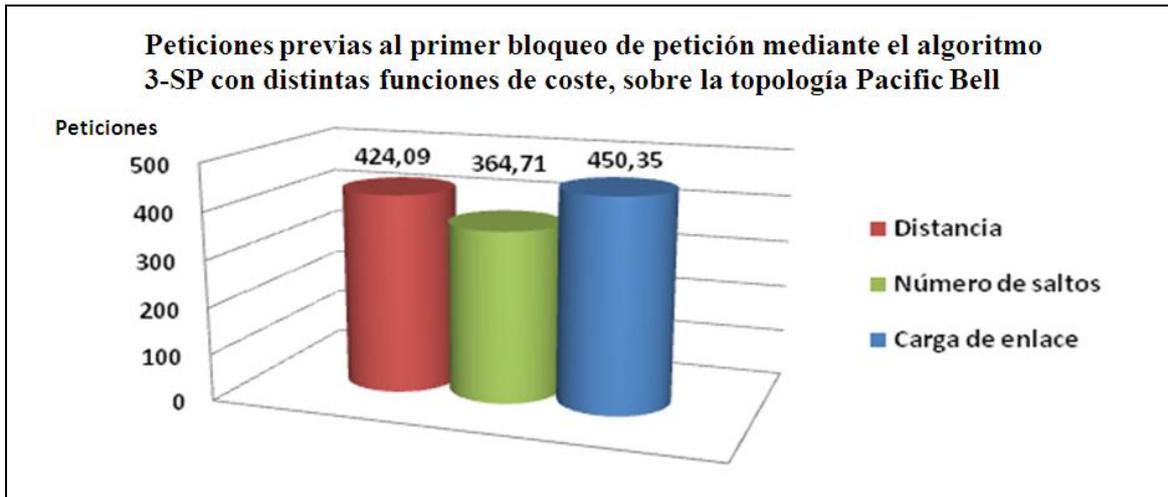


Ilustración 58: Peticiones previas a primer bloqueo para distintas funciones de coste sobre Pacific Bell

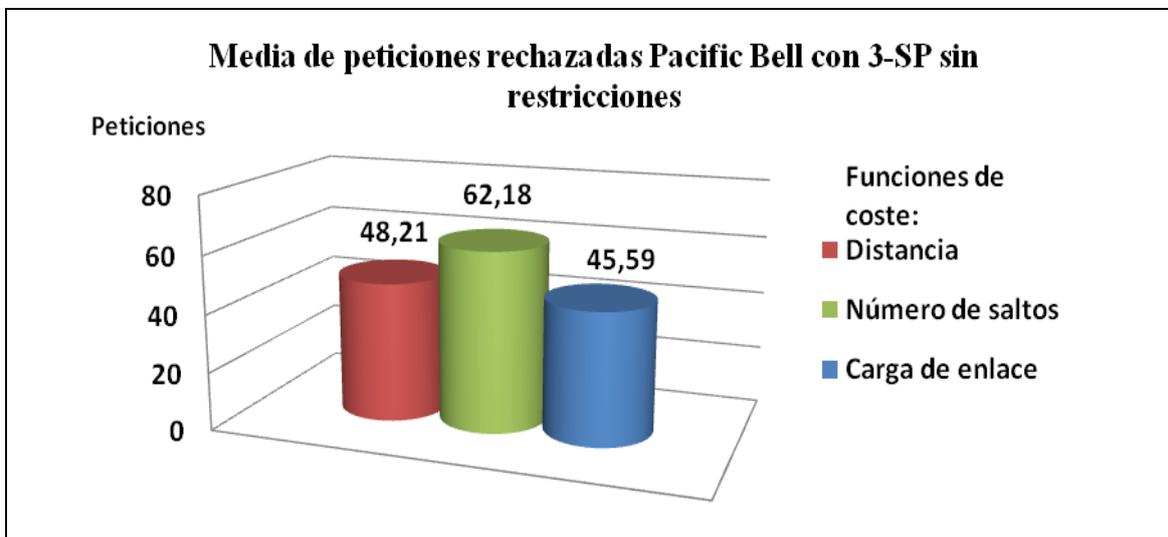


Ilustración 59: Peticiones rechazadas 3-SP Pacific Bell para distintas funciones de coste

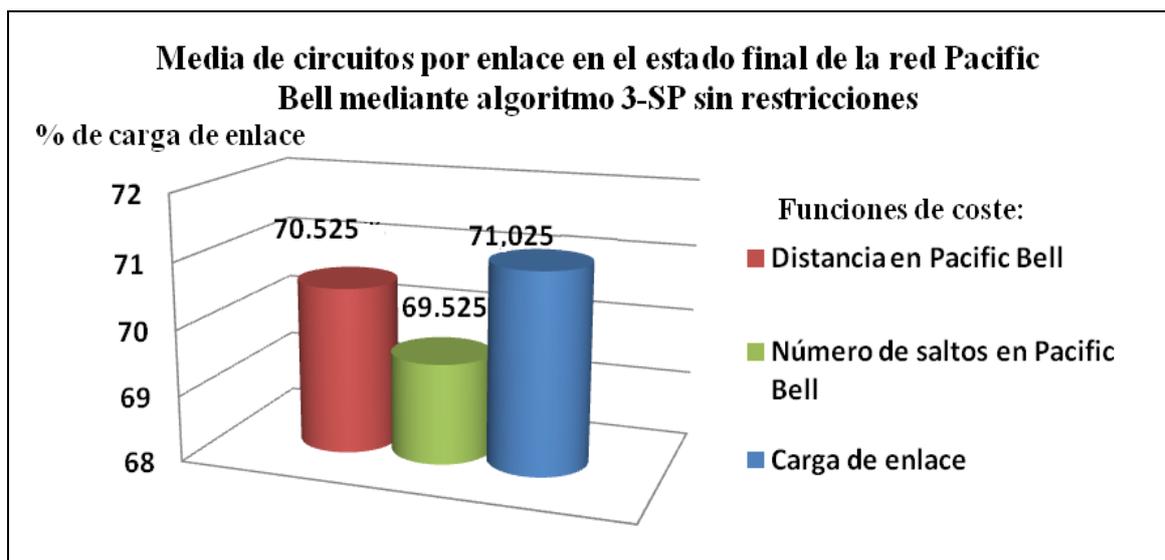


Ilustración 60: Carga de enlace en el estado final de la red Pacific Bell tras el algoritmo 3-SP

En la Tabla 37 se presentan los estadísticos correspondientes a las Ilustraciones 58 a 60.

Cabe destacar que el porcentaje de carga de los enlaces es mayor para la función de coste que considera la carga de los enlaces, lo que indica que se aprovechan mejor los recursos de red y por otro lado, que se seleccionan caminos más largos.

Función de coste	Parámetros	Peticiones previas a primer rechazo	Peticiones rechazadas	Circuitos por enlace en el estado final de red
Distancia	Media	424.09	48.21 / 8.77%	56.42 / 70.53 %
	S(x)	19.353	2.483	0.398
	E ±	3.840	0.493	0.079
Número de saltos	Media	364.71	62.18/ 11.31%	55.62 / 69.53 %
	S(x)	23.658	4.596	0.797
	E ±	4.694	0.912	0.158
Carga de enlace IABR-FFWA	Media	450.35	45.59 / 8.29%	56.82 / 71.03 %
	S(x)	12.482	2.336	0.341
	E ±	2.477	0.463	0.068

Tabla 37: Análisis estadísticos Pacific Bell para distintas funciones de coste

En la Tabla 38 se presenta un análisis estadístico del tiempo de procesamiento por petición para distintas funciones de coste.

Función de coste	Parámetros	Tiempo de procesamiento por petición (ms)
Distancia	Media	26.81
	S(x)	12.446
	E ±	2.469
Número de saltos	Media	30.12
	S(x)	1.086
	E ±	0.215
Carga de enlace IABR-FFWA	Media	23.67
	S(x)	13.767
	E ±	2.732

Tabla 38: Análisis estadístico del tiempo de simulación Pacific Bell

Peticiones previas al primer bloqueo de petición

En las Ilustraciones 54 y 58 así como en las Tablas 35 y 37, se representa el número de peticiones previas al primer bloqueo para las topologías NSFNET y Pacific Bell, respectivamente.

Sobre la topología NSFNET, mediante una función de coste adaptativa que considera la carga de los enlaces, se procesan 527.92 peticiones en media previamente al primer rechazo de petición. Sin embargo, mediante una función de coste fija basada en distancia sólo se procesan 291.45 peticiones. La mejora en el retraso del primer bloqueo de petición mediante la función de coste adaptativa es del orden de un 80%.

En la topología Pacific Bell los mejores resultados en cuanto al retraso del primer bloqueo de petición, se obtienen de igual modo para la función de coste basada en la carga de los enlaces, obteniéndose un procesado de 450.35 peticiones. El caso peor se obtiene mediante una función de coste fija basada en número de saltos, procesándose 364.71 peticiones previamente al primer rechazo de petición. Por lo tanto, la mejora mediante la función de coste adaptativa es del orden del 23.5%.

Mediante los resultados obtenidos puede generalizarse para cualquier topología un retraso en la petición de primer bloqueo realizando equilibrado de carga; es decir,

mediante funciones de coste adaptativas que consideren la carga de los enlaces en su función de coste.

Sin embargo, comparando los resultados obtenidos para las funciones de coste fijo en ambas topologías; es decir, distancia y número de saltos, se obtienen resultados encontrados, lo que significa que la función de coste más adecuada depende de la topología de red y otros parámetros de simulación.

Número de peticiones rechazadas

En las Ilustraciones 55 y 59 se representa el número medio de peticiones bloqueadas para las topologías NSFNET y Pacific Bell, respectivamente. Los resultados obtenidos son acordes con lo ya mencionado respecto al número de peticiones previas al primer bloqueo: el número de peticiones bloqueadas disminuye notablemente mediante una función de coste adaptativa respecto a la carga de los enlaces.

- Para la topología NSFNET se reduce el número de peticiones rechazadas descendiendo del 11.88% para una función de coste basada en distancia al 0.15% mediante una función de coste basada en la carga de los enlaces.
- En el caso de la topología Pacific Bell el porcentaje de peticiones rechazadas descende desde el 11.31% para una función de coste basada en número de saltos, al 8.29% en el caso de carga de enlace.

Circuitos por enlace en el primer rechazo de petición

En las Ilustraciones 56 y 60 se representa el número medio de circuitos por enlace.

- Para la topología NSFNET la carga media final oscila entre un 66% para una función de coste basada en distancia y un 70% para una función de coste basada en la carga por enlace.
- En el caso de la topología Pacific Bell la carga media final oscila entre un 69% para una función de coste basada en número de saltos y un 71% para una función de coste basada en la carga por enlace.

Tiempo de simulación

En la Ilustración 57 así como en las Tablas 36 y 38, se representa el tiempo medio de procesamiento por petición. Estos tiempos obtenidos mediante el simulador basado en Matlab han de tomarse con cierta cautela, precisamente por la alta dependencia tanto del motor de simulación, como de las propias prestaciones del ordenador utilizado.

Para ambas topologías se obtiene un menor tiempo de procesamiento por petición para la función de coste basada en la carga del enlace. La causa de este resultado puede darse en que se está simulando un algoritmo 3-SP, que comprueba la continuidad de longitud de onda para los tres caminos precalculados en caso necesario. Mediante una función de coste basada en la carga de los enlaces se facilita la obtención de una longitud de onda disponible que permita satisfacer la restricción de continuidad.

Por lo tanto la función de coste diseñada deberá considerar los siguientes criterios:

- En primer lugar, la necesidad de realizar cierto equilibrado de carga o balanceo de los enlaces para alargar la vida de la red.
- En segundo lugar, la función de coste debe estar adaptada a las circunstancias de transmisión, topología de red y tráfico, por lo que es deseable la posibilidad de configuración de la función de coste para su adaptación al escenario específico. Esto puede realizarse mediante el establecimiento de pesos de los efectos considerados en la función de coste.

5.7 Casos de estudio en tiempo real considerando restricciones físicas

5.7.1 Impacto de las restricciones físicas de acuerdo a la distancia de transmisión.

En este caso de estudio se evalúa el impacto acumulativo de las restricciones físicas con la distancia sobre la probabilidad de bloqueo del algoritmo IABR-FFWA. Para ello se considera la topología NSFNET con distintos factores de escala $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$, de forma que puede apreciarse el impacto de la distancia de los enlaces. El formato de modulación considerado es DQPSK.

Se realizan simulaciones a 10 Gbps y 40 Gbps con la función de coste del algoritmo IABR-FFWA parametrizados los pesos de la siguiente forma:

- El peso de OSNR atribuido es de 0.6.
- El peso de carga de enlace atribuido es de 0.4.

En la Tabla 39 se presentan en forma numérica el número de caminos en un tramo, en dos tramos y las peticiones bloqueadas, a tasa de 10 Gbps. Se observa un decaimiento considerable de la probabilidad de bloqueo a medida que las distancias de los enlaces decrecen. En concreto entre la topología NSFNET $\frac{1}{2}$ y NSFNET $\frac{1}{6}$; es decir, con una

disminución de la distancia de los enlaces de factor 3, la probabilidad de bloqueo disminuye 17.33 puntos porcentuales.

10 Gbps	Parámetros	Caminos en 1 tramo	Caminos en 2 tramos	Peticiones bloqueadas	Probabilidad de bloqueo
NSFNET a escala $\frac{1}{2}$	Media	390.02	54.41	105.57	19.19%
	S(x)	4.733	3.403	2.610	2.610
	E ±	0.939	0.675	0.518	0.518
NSFNET a escala $\frac{1}{4}$	Media	530.81	0	19.19	3.49%
	S(x)	3.067	0.000	3.067	3.067
	E ±	0.609	0.000	0.609	0.609
NSFNET a escala $\frac{1}{6}$	Media	539.74	0.00	10.26	1.86%
	S(x)	2.627	0.000	2.627	2.627
	E ±	0.521	0.000	0.521	0.521

Tabla 39: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre topología NSFNET $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$ a 10 Gbps

De la misma manera, para las distancias de los enlaces de las topologías NSFNET $\frac{1}{4}$ y NSFNET $\frac{1}{6}$ no se requiere del cálculo de caminos en dos tramos a 10 Gbps.

En la Tabla 40 se presenta el número de caminos en un tramo, en dos tramos y las peticiones bloqueadas, a tasa de 40 Gbps. Las probabilidades de bloqueo a 40 Gbps son significativamente mayores que a 10 Gbps para las tres topologías NSFNET.

40 Gbps	Parámetros	Caminos en 1 tramo	Caminos en 2 tramos	Peticiones bloqueadas	Probabilidad de bloqueo
NSFNET a escala $\frac{1}{2}$	Media	187	107	256	46.55 (%)
	S(x)	0.000	0.000	0.000	0.000
	E ±	0.000	0.000	0.000	0.000
NSFNET a escala $\frac{1}{4}$	Media	349.71	60.53	139.76	25.41 (%)
	S(x)	4.973	3.195	3.624	3.624
	E ±	0.987	0.634	0.719	0.719
NSFNET a escala $\frac{1}{6}$	Media	444.13	38.96	66.91	12.17 (%)
	S(x)	4.844	2.867	3.201	3.201
	E ±	0.961	0.569	0.635	0.635

Tabla 40: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre topología NSFNET $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$ a 40 Gbps

Para la topología NSFNET $\frac{1}{2}$ la probabilidad de bloqueo a 40 Gbps es 27.36 puntos porcentuales mayor que a 10 Gbps.

A 40 Gbps al disminuir la distancia de los enlaces por un factor 3; es decir, para la topología NSFNET $\frac{1}{6}$ respecto a la topología NSFNET $\frac{1}{2}$, la probabilidad de bloqueo disminuye 34.38 puntos porcentuales.

En cuanto al número de caminos calculados en dos tramos a 40 Gbps, este número disminuye desde 107 (19.45%) para la topología NSFNET $\frac{1}{2}$, a 38.96 (7%) para la topología NSFNET $\frac{1}{6}$, debido a una menor distancia de los enlaces. El descenso en el número de caminos calculados en dos tramos es de 12.45 puntos porcentuales, lo que indica el menor impacto de las restricciones físicas al disminuir la distancia de los enlaces de la red.

En las Ilustraciones 61 a 65 se representa el porcentaje de peticiones procesadas en un tramo, en dos tramos y las peticiones bloqueadas para las distintas topologías y tasas de transmisión simuladas.

Para la topología de red mayor a 10 Gbps, que se representa en la Ilustración 61, un 10% de peticiones se calculan en dos tramos, salvándose de este modo las restricciones físicas.

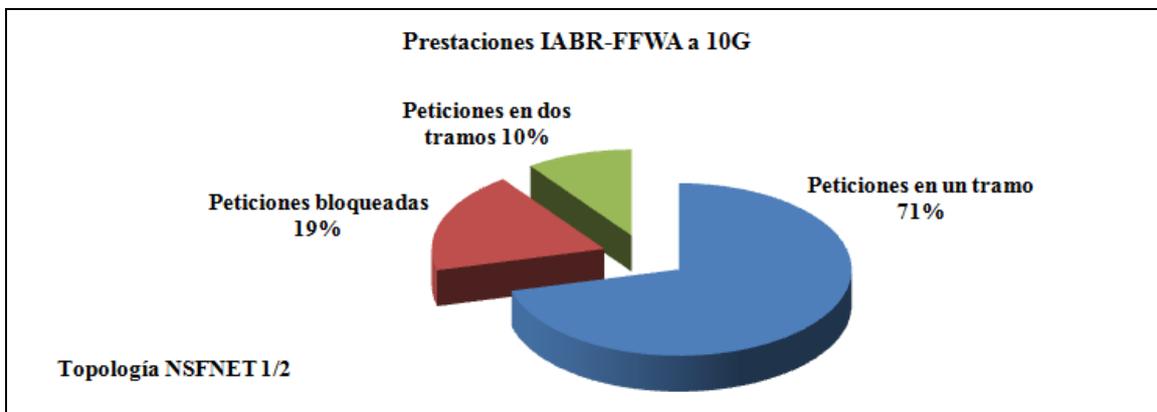


Ilustración 61: Prestaciones IABR-FFWA a 10 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{2}$

Para la misma topología de red a tasa de 40 Gbps, se observa un aumento significativo de la probabilidad de bloqueo, que llega a alcanzar el 47%. Por otro lado el porcentaje de caminos en dos tramos aumenta 9 puntos porcentuales, como puede observarse en la Ilustración 62.

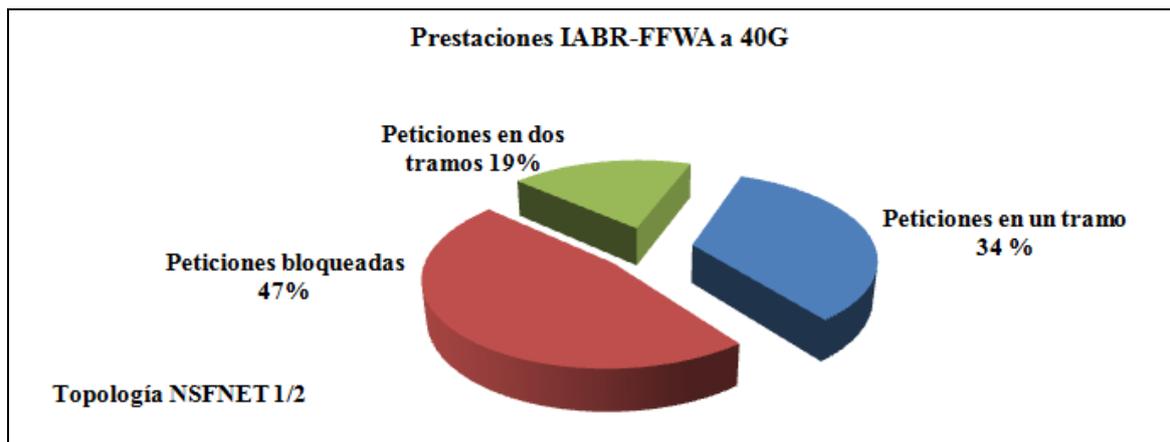


Ilustración 62: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{2}$

Para las distancias de la topología NSFNET $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{6}$ a 10 Gbps, no se requiere el cómputo de caminos en dos tramos. El porcentaje de bloqueo a 10 Gbps es tan solo un 3%, ya que la red es capaz de acomodar buena parte de las peticiones, como muestra la Ilustración 63.



Ilustración 63: Prestaciones IABR-FFWA a 10 Gbps con topología NSFNET $\frac{1}{4}$

En la Ilustración 64 se observa que el número de peticiones computadas en dos tramos es de un 11% para la topología NSFNET $\frac{1}{4}$ a 40 Gbps. Se trata de un descenso de 8 puntos porcentuales respecto a las peticiones calculadas en dos tramos para la topología NSFNET $\frac{1}{2}$ y 4 puntos porcentuales mayor que el número de caminos en dos tramos requeridos para la topología NSFNET $\frac{1}{6}$.

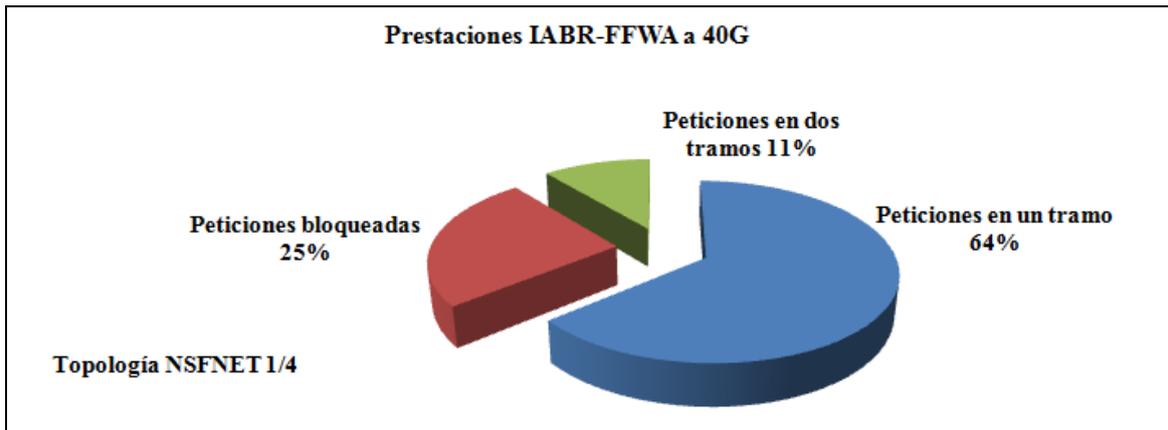


Ilustración 64: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET ¼

La Ilustración 65 muestra una probabilidad de bloqueo del 12% a 40 Gbps para la topología NSFNET ⅓ con el algoritmo IABR-FFWA, de acuerdo a una configuración de la función de coste concreta.

Un 81% de las peticiones se calculan en un tramo. Además, un 7% de las peticiones se calculan en dos tramos, lo que supone una mejora de hasta un 8.64% en peticiones procesadas, debido al cómputo de caminos en dos tramos mediante la posibilidad de regeneración que ofrece el algoritmo IABR-FFWA.

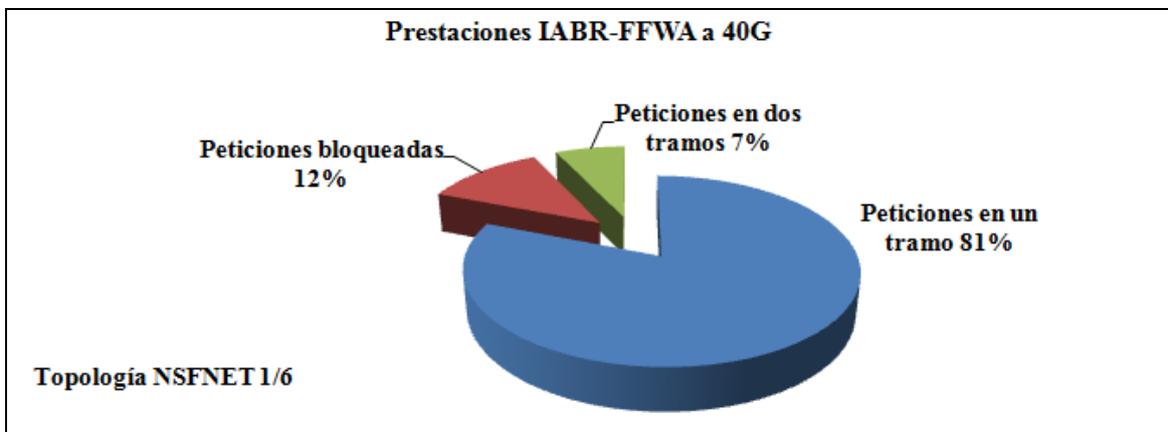


Ilustración 65: Prestaciones IABR-FFWA a 40 Gbps con topología NSFNET ⅓

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, las restricciones físicas a 10 Gbps tienen un impacto limitado o controlable para redes de media distancia.

Sin embargo, el efecto de la distancia a 40 Gbps es mayor porque los efectos físicos tienen un mayor impacto; por un lado la pérdida de OSNR es mayor, por otro la PMD máxima permitida es menor.

Quizá, la conclusión más relevante, sea la posibilidad de ampliación de hasta un 8.64% en peticiones procesadas, que añade el algoritmo IABR-FFWA, salvando las restricciones físicas que acentúa la distancia.

5.7.2 Ajuste de la función de coste del algoritmo IABR-FFWA

El algoritmo IABR-FFWA está dotado de una función de coste adaptativa y parametrizable, que considera tanto un criterio de nivel de carga de los enlaces como un criterio de pérdida de OSNR por enlace, que se realiza en función del número de vanos del mismo. No es adecuado generalizar qué pesos son los más adecuados de forma independiente a la topología y características de transmisión.

Para la realización de este caso de estudio se ha tomado el escenario de red Pacific Bell escalada por un factor 2 a tasa de 40 Gbps.

En las Tablas 41 a 44 se representa un análisis estadístico del número de circuitos en el enlace más cargado, para cuatro niveles de peticiones establecidas.

- Tabla 41: Peticiones establecidas de 1 a 100.
- Tabla 42: Peticiones establecidas de 125 a 250.
- Tabla 43: Peticiones establecidas de 275 a 400.
- Tabla 44: Peticiones establecidas de 425 a 550.

Pesos de los parámetros de la función de coste	Parámetros	Circuitos en el enlace más cargado					
	Número de peticiones	1	10	25	50	75	100
Pérdida de OSNR = 0 Carga de enlace = 1	Media	0.98	2.79	5.63	10.39	14.96	19.50
	S(x)	0.141	0.656	1.134	1.399	1.853	1.856
	E ±	0.028	0.130	0.225	0.278	0.368	0.368
Pérdida de OSNR = 0.6 Carga de enlace = 0.4	Media	1.00	3.49	6.85	11.84	16.84	21.28
	S(x)	0.000	0.882	1.266	1.802	2.178	2.243
	E ±	0.000	0.175	0.251	0.358	0.432	0.445
Pérdida de	Media	1.00	3.48	6.83	11.88	16.97	21.65

OSNR = 0.8 Carga de enlace = 0.2	S(x)	0.000	0.882	1.288	1.811	2.254	2.409
	E ±	0.000	0.175	0.255	0.359	0.447	0.478
Pérdida de OSNR = 1 Carga de enlace = 0	Media	1.00	3.52	7.03	12.18	17.23	21.98
	S(x)	0.000	0.893	1.259	1.822	2.229	2.399
	E ±	0.000	0.177	0.250	0.362	0.442	0.476

Tabla 41: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste I

Pesos de los parámetros de la función de coste	Parámetros	Circuitos en el enlace más cargado					
		125	150	175	200	225	250
Pérdida de OSNR = 0 Carga de enlace = 1	Media	24.11	28.78	33.55	38.19	42.88	47.46
	S(x)	2.201	2.529	2.426	2.729	2.868	2.942
	E ±	0.437	0.502	0.481	0.542	0.569	0.584
Pérdida de OSNR = 0.6 Carga de enlace = 0.4	Media	25.97	30.65	35.33	40.02	44.76	49.49
	S(x)	2.611	2.709	2.807	3.165	3.467	3.497
	E ±	0.518	0.538	0.557	0.628	0.688	0.694
Pérdida de OSNR = 0.8 Carga de enlace = 0.2	Media	26.45	31.23	35.80	40.47	45.30	49.89
	S(x)	2.676	2.707	2.749	2.880	3.189	3.168
	E ±	0.531	0.537	0.545	0.571	0.633	0.629
Pérdida de OSNR = 1 Carga de enlace = 0	Media	26.81	31.77	36.41	40.96	45.86	50.52
	S(x)	2.707	2.828	2.825	3.055	3.306	3.205
	E ±	0.537	0.561	0.561	0.606	0.656	0.636

Tabla 42: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste II

Pesos de los parámetros de la función de coste	Parámetros	Circuitos en el enlace más cargado					
	Número de peticiones	275	300	325	350	375	400
Pérdida de OSNR = 0 Carga de enlace = 1	Media	51.95	56.65	61.36	65.51	70.20	74.38
	S(x)	2.955	3.252	3.044	3.096	2.944	3.110
	E ±	0.586	0.645	0.604	0.614	0.584	0.617
Pérdida de OSNR = 0.6 Carga de enlace = 0.4	Media	54.11	58.88	63.45	67.65	72.27	76.14
	S(x)	3.432	3.588	3.459	3.563	3.299	2.913
	E ±	0.681	0.712	0.686	0.707	0.655	0.578
Pérdida de OSNR = 0.8 Carga de enlace = 0.2	Media	54.51	59.27	63.88	67.98	72.50	72,50
	S(x)	3.119	3.181	3.138	3.306	3.057	3.057
	E ±	0.619	0.631	0.623	0.656	0.607	0.607
Pérdida de OSNR = 1 Carga de enlace = 0	Media	54.90	59.42	64.06	68.25	72.76	76.49
	S(x)	3.164	3.163	2.912	3.073	2.978	2.513
	E ±	0.628	0.628	0.578	0.610	0.591	0.499

Tabla 43: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor con distintas funciones de coste III

Pesos de los parámetros de la función de coste	Parámetros	Circuitos en el enlace más cargado					
	Número de peticiones	425	450	475	500	525	550
Pérdida de OSNR = 0 Carga de enlace = 1	Media	78.35	79.86	80.00	80.00	80.00	80.00
	S(x)	2.096	0.513	0.000	0.000	0.000	0.000
	E ±	0.416	0.102	0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdida de OSNR = 0.6 Carga de enlace = 0.4	Media	79.27	79.96	80.00	80.00	80.00	80.00
	S(x)	1.406	0.197	0.000	0.000	0.000	0.000
	E ±	0.279	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000

Pérdida de OSNR = 0.8 Carga de enlace = 0.2	Media	79.34	79.95	80.00	80.00	80.00	80.00
	S(x)	1.297	0.261	0.000	0.000	0.000	0.000
	E ±	0.257	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdida de OSNR = 1 Carga de enlace = 0	Media	78.95	79.71	79.97	80.00	80.00	80.00
	S(x)	1.373	0.729	0.223	0.000	0.000	0.000
	E ±	0.273	0.145	0.044	0.000	0.000	0.000

Tabla 44: Comparativa de circuitos en el enlace más cargado para la red Pacific Bell escalada por un factor 2 con distintas funciones de coste IV

A lo largo de las Tablas 41 a 44 se observa que el enlace más cargado se llena de forma muy similar para todas las simulaciones.

En la Tabla 45 se representan las prestaciones del algoritmo IABR-FFWA obtenidas en función de los pesos de la función de coste. Se observa el retraso de la primera petición rechazada siempre que se considere la OSNR como parte de la función de coste.

Pesos de los parámetros de la función de coste	Parámetros	Caminos en dos tramos	Peticiones bloqueadas	Primera petición bloqueada
Pérdida de OSNR = 0 Carga de enlace = 1	Media	44.89	48.97	100.04
	S(x)	3.659	2.427	172.321
	E ±	0.726	0.481	34.192
Pérdida de OSNR = 0.2 Carga de enlace = 0.8	Media	40.52	49.39	422.32
	S(x)	3.103	2.169	17.490
	E ±	0.616	0.430	3.470
Pérdida de OSNR = 0.4 Carga de enlace = 0.6	Media	36.26	49.85	419.66
	S(x)	3.341	2.315	18.059
	E ±	0.663	0.459	3.583
Pérdida de OSNR = 0.6 Carga de enlace = 0.4	Media	33.97	50.09	419.57
	S(x)	2.728	2.387	18.074
	E ±	0.541	0.474	3.586
Pérdida	Media	33.76	50.82	417.61

de OSNR = 0.8 Carga de enlace = 0.2	S(x)	2.734	2.405	17.090
	E ±	0.543	0.477	3.391
Pérdida de OSNR = 1 Carga de enlace = 0	Media	33.80	53.40	410.03
	S(x)	2.785	2.570	16.352
	E ±	0.553	0.510	3.245

Tabla 45: Comparativa de prestaciones Pacific Bell escalada por un factor 2 a 40 Gbps

Para distintas configuraciones que consideran peso de OSNR, la primera petición fallida tiene lugar alrededor de la petición 400. Sin embargo, si no se considera la OSNR en la función de coste, la primera petición rechazada tiene lugar en torno a la petición 100.

En la Ilustración 66 se observa que los resultados en cuanto a peticiones bloqueadas y caminos calculados en dos tramos, tienen una variación pequeña con la función de coste. Sin embargo, puede retrasarse la primera petición rechazada mediante la adecuada configuración de la función de coste.

Generalizando, las mejores prestaciones se obtienen en la zona central de la mencionada Ilustración 66; es decir, configurando con cierto peso los parámetros pérdida de OSNR y carga de enlace en la función de coste.

Se considera que puede ser una función de coste optimizada aquella que considere un peso de OSNR de 0.2 y un peso de carga de los enlaces de 0.8 permitiendo el retraso de la petición de primer bloqueo.

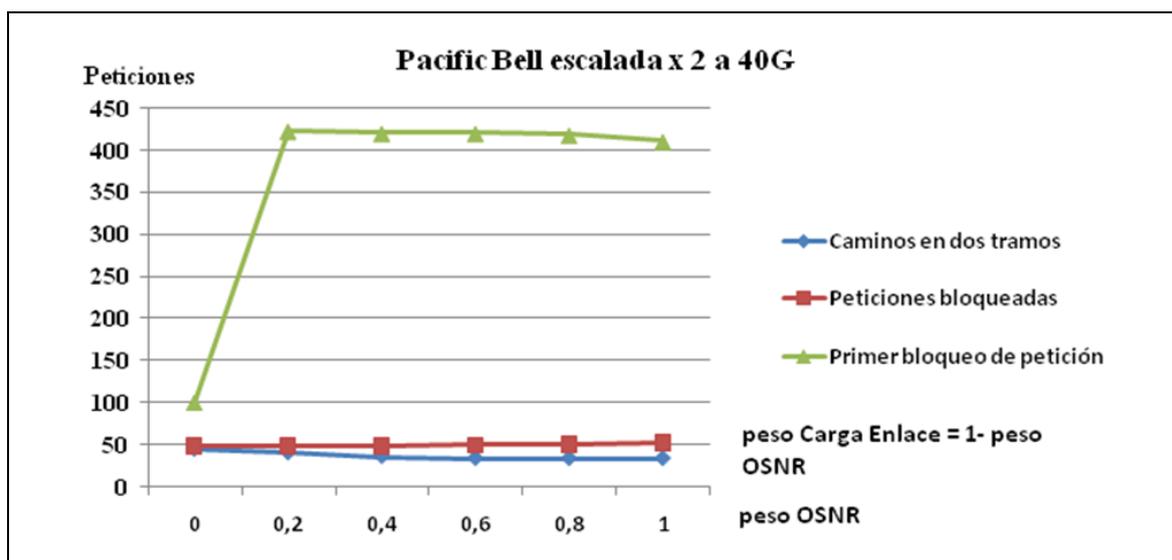


Ilustración 66: Comparativa de prestaciones en red Pacific Bell escalada por un factor 2 a 40 Gbps para distintas funciones de coste

En la Ilustración 67 se presentan las peticiones procesadas para la función de coste optimizada. La probabilidad de bloqueo se reduce a un 9%.

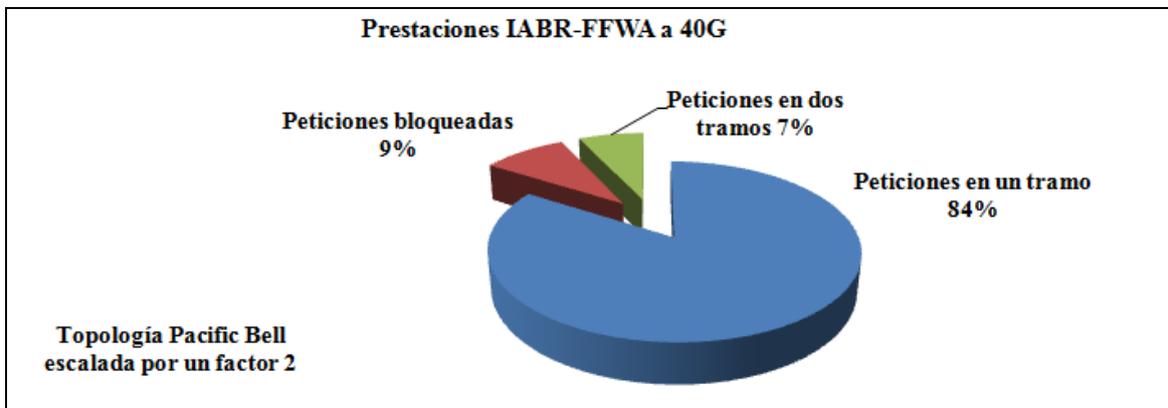


Ilustración 67: Prestaciones del algoritmo IABR-FFWA a 40 Gbps sobre la topología Pacific Bell escalada por un factor 2 mediante la función de coste con pesos optimizados

5.7.3 Comparativa en prestaciones de IABR-FFWA respecto a 1-CSP

En este apartado se expone una comparativa en prestaciones del algoritmo IABR-FFWA sobre la topología Pacific Bell, escalada por un factor 2 a 40 Gbps y formato de modulación DQPSK, respecto a un algoritmo 1-CSP con función de coste basada en distancia.

Como puede observarse en los resultados obtenidos en las Tablas 46 a 48, se obtienen mejores prestaciones mediante el algoritmo IABR-FFWA para las características de transmisión descritas respecto al algoritmo 1-CSP.

Algoritmo	Pesos de la función de coste	Parámetros	Primera petición rechazada	Peticiones rechazadas	Probabilidad de bloqueo
1-CSP	Distancia	Media	10.80	57.51	10.46 %
		S(x)	10.678	1.778	1.778
		E ±	2.119	0.353	0.353
IABR-FFWA	Pérdida de OSNR= 0.2 Carga de enlace = 0.8	Media	422.32	49.39	8.98%
		S(x)	17.490	2.169	2.169
		E ±	3.470	0.430	0.430

Tabla 46: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP I

Algoritmo	Pesos de la función de coste	Parámetros	Peticiones en un tramo	Peticiones en dos tramos	Carga media de los enlaces en el estado final de red
1-CSP	Distancia	Media	492.49	0	51.83 / 64.79%
		S(x)	1.778	0.000	0.268
		E ±	0.353	0.000	0.053
IABR-FFWA	Pérdida de OSNR= 0.2 Carga de enlace = 0.8	Media	460.09	40.52	55.59 / 69.49%
		S(x)	4.231	3.103	0.308
		E ±	0.840	0.616	0.061

Tabla 47: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP II

Mejora de prestaciones mediante IABR-FFWA respecto a 1-CSP	Retraso medio de la Primera Petición Rechazada	Disminución media de la probabilidad de bloqueo	Aumento de la carga media de los enlaces
Valor absoluto	411.52 peticiones	1.48 puntos porcentuales	4.7 puntos porcentuales
Valor relativo	3810.4%	14.11%	7.25%

Tabla 48: Comparativa en prestaciones IABR-FFWA vs 1-CSP III

En las Ilustraciones 68 a 70 se representan las mejoras más significativas.

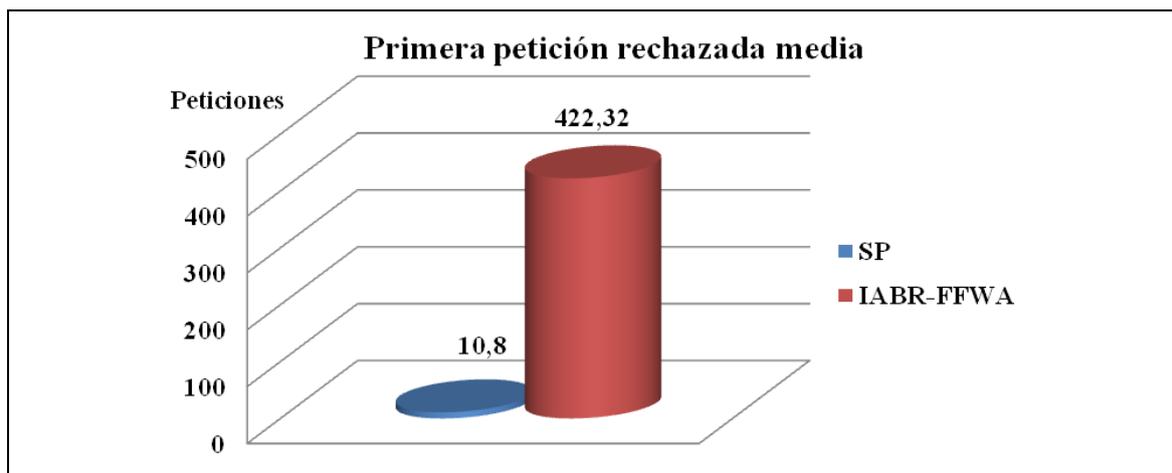


Ilustración 68: Comparativa de prestaciones respecto a la petición de primer rechazo media IABR-FFWA vs 1-CSP

Como puede observarse en la Ilustración 68, la mayor ventaja del algoritmo IABR-FFWA es que permite retrasar el primer bloqueo de petición considerablemente.

El retraso del primer bloqueo de petición garantiza la viabilidad de la implantación de una malla fotónica troncal, permitiendo que no se bloqueen peticiones antes de un determinado umbral de “*lightpaths*” establecidos.

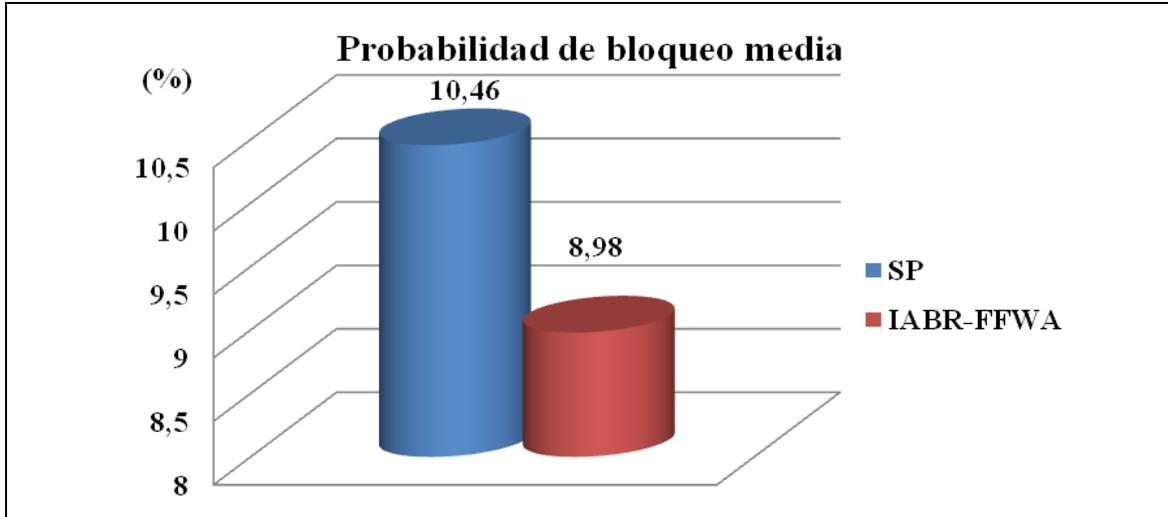


Ilustración 69: Comparativa de prestaciones respecto a la petición de primer rechazo IABR-FFWA vs 1-CSP

El algoritmo IABR-FFWA disminuye la probabilidad de bloqueo 1.48 puntos porcentuales.

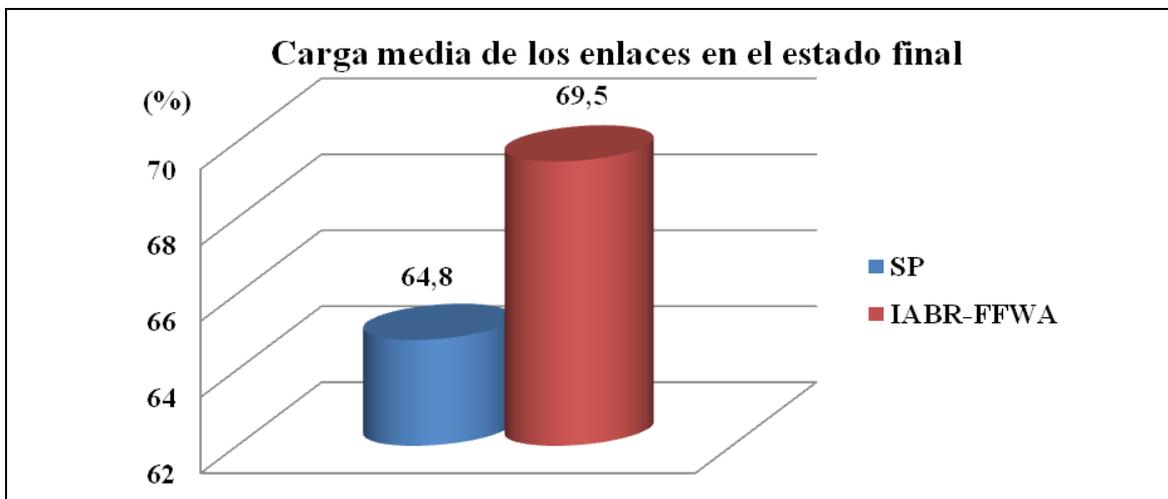


Ilustración 70: Comparativa de prestaciones respecto a la carga media de los enlaces IABR-FFWA vs 1-CSP

La Ilustración 70 muestra la carga media de los enlaces tras el proceso de 550 peticiones. La carga media de los enlaces mediante el algoritmo IABR-FFWA respecto del algoritmo 1-CSP aumenta 4.7 puntos porcentuales; es decir el porcentaje de carga de los enlaces es un 7.25% mayor. La razón de ello es:

- En primer lugar la función de coste realiza equilibrado de carga, proporcionando caminos más largos que aumentan la carga media de los enlaces.

- En segundo lugar, permitiendo caminos en dos tramos en el algoritmo IABR-FFWA, también se aumenta la carga media de los enlaces.
- Finalmente, puesto que la probabilidad de bloqueo de IABR-FFWA es algo menor, significa que se establece un mayor número de circuitos sobre la red, lo que significa una mayor carga de los enlaces, respecto al algoritmo 1-CSP.

Conclusiones

En este apartado ha quedado demostrada una mejora en prestaciones mediante el algoritmo IABR-FFWA diseñado, respecto a la propuesta 1-CSP. Dicho aumento de prestaciones es mayor a 40 Gbps que a 10 Gbps, puesto que limita el impacto de las restricciones físicas.

El retraso en la primera petición rechazada puede ampliarse sensiblemente mediante una adecuada configuración de la función de coste.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES

6.1 Estrategias DRWA clásicas

Del estudio del problema clásico DRWA, que considera bonanza de los “*lightpaths*” establecidos, así como de sus estrategias R y WA, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La tarea de encaminamiento, R, tiene un mayor impacto hoy día sobre la probabilidad de bloqueo, que la tarea de asignación de longitud de onda, WA, una vez se dispone de fibras de 80 o 160 canales o longitudes de onda (“ λ ”). Por lo tanto, la necesidad de adecuar la estrategia de R a la topología de red y características de transmisión es mayor.
- La función de coste del algoritmo de encaminamiento, R, debe adaptarse a la topología de red y características de transmisión concretas del escenario. Las estrategias adaptativas posibilitan la inclusión de criterios de carga de los enlaces en la función de coste. Esto es muy conveniente ya que se evita la congestión de los enlaces y a consecuencia se retrasa el primer rechazo de petición y disminuye la probabilidad de bloqueo.
- Por ejemplo, en cuanto a la primera petición rechazada se obtienen mejoras con respecto a funciones de coste fijo, que pueden oscilar entre un 20% y un 80%, dependiendo de la topología, mediante el empleo de una función de coste adaptativa que realice equilibrado de carga.

- Por otro lado, se consiguen mejores prestaciones al aumentar el factor (“k”) en los algoritmos “*Shortest-Path*”. Por ejemplo, para (“k”) igual a 3 se obtienen retrasos de la petición de primer bloqueo del 10.3% en la topología NSFNET y del 19.4% en la topología Pacific Bell, respecto a (“k”) igual a 1.
- Los efectos de la capa física pueden disminuir la calidad de señal transmitida, incluso condicionando en algunos casos una adecuada recepción de la señal. En la ITU-T G.680 se expone formulación de efectos físicos relevantes.
- El impacto de los fenómenos físicos aumenta con la tasa de transmisión, ya que los efectos dispersivos se tornan críticos. El problema DRWA clásico ha quedado anticuado para altas velocidades de transmisión 40 Gbps o 100 Gbps. Es necesario el diseño de estrategias PLI-DRWA viables para el tiempo real.

Impacto de la protección dedicada (1+1) considerando una adecuada calidad de señal transmitida

La protección (1+1) mediante caminos disjuntos (que no comparten enlaces entre los caminos denominados principal y de protección) tiene un impacto negativo sobre la capacidad para procesar peticiones de la red. Es conveniente su uso para “*lightpaths*” específicos, pero no para el procesamiento de todas las peticiones.

- Para la topología NSFNET, sin protección, el llenado del enlace más cargado se produce en torno a la petición 450; bajando hasta la petición 250 cuando hay protección (1+1). En paralelo, también el primer bloqueo de petición sufre un adelanto al pasar de la petición 493 a la 195; es decir, hay un empeoramiento del orden del 60%.
- Para la topología Pacific Bell, sin protección, la primera petición bloqueada es la 365.71, mientras que con protección, el bloqueo se anticipa a la petición 131.8. También en este caso hay una reducción de las prestaciones de algo más de un 60%.

6.2 Estrategias PLI-DRWA

Los algoritmos PLI-DRWA tienen como objetivo dar respuesta a las limitaciones DRWA clásicas, que consideran idealidad en el medio de transmisión y ausencia de fenómenos dispersivos o interferentes.

Se conocen dos tipos de algoritmos PLI-DRWA:

- En los algoritmos PLIC-DRWA se calculan caminos de acuerdo a una función de coste sin restricciones físicas, y posteriormente se valida la calidad de señal de los caminos calculados.

- Mediante los algoritmos PLIA-DRWA no sólo se valida la calidad de los caminos calculados, sino que se incluyen criterios relacionados con los fenómenos físicos en la función de coste del algoritmo, lo que permite la obtención de caminos con mayor calidad de señal.

La RFC-4054 recomienda validar la bonanza física de los caminos calculados mediante el establecimiento de umbrales de parámetros determinantes, como OSNR y PMD, que garanticen la adecuada recepción para una BER objetivo.

Hoy día, la tarea del encaminamiento, R, tiene una mayor influencia en las prestaciones de red que la longitud de onda seleccionada. Por esta razón es prioritaria la consideración de efectos físicos en dicha tarea.

Función de coste del algoritmo IABR-FFWA

El algoritmo IABR-FFWA considera en su función de coste dos criterios:

- Pérdida de OSNR por enlace.
- Carga del enlace (en número de longitudes de onda ocupadas).

Respecto a la consideración de pérdida de OSNR por enlace, el algoritmo IABR-FFWA se clasifica como de tipo PLIA-DRWA puesto que considera el impacto de fenómenos físicos en la función de coste. De esta manera es posible seleccionar los caminos con mayor calidad de señal mediante el parámetro de OSNR.

Es imprescindible que la función de coste IABR-FFWA incluya cierto peso debido a OSNR para garantizar el cómputo de “*lightpaths*” viables físicamente.

La consideración de un criterio de carga de los enlaces en la función de coste propicia un balanceo de carga en la red que, bajo la condición de una adecuada calidad de transmisión, QoT, permite mejorar las prestaciones de red.

El impacto de la carga de los enlaces se establece mediante una función de coste en dos tramos. Si la red está poco cargada, el coste por carga de enlace tiene sentido que sea muy bajo, mientras que la penalización real debida a este efecto se establezca a partir de cierto nivel de carga de los enlaces.

Ambos criterios se incorporan a la función de coste mediante el establecimiento de pesos para cada uno de ellos. De esta manera se consigue por un lado, mejorar el alcance sin regeneración, y por otro, un mayor aprovechamiento de la red repartiendo la carga entre los nodos.

Mediante una adecuada configuración de la función de coste es posible obtener una mejora de prestaciones reduciendo el número de peticiones bloqueadas Pero lo más

relevante es la posibilidad de retrasar sensiblemente el primer rechazo de petición, alargando el tiempo de vida de la red.

Estrategia de establecimiento de prioridad entre los regeneradores disponibles del algoritmo IABR-FFWA

La estrategia diseñada constituye un algoritmo en sí mismo, basado en el camino de menor coste. No considera el estado de carga de la red, sino únicamente un criterio de alcance máximo de cada tramo del camino, en función de la OSNR objetivo y de las características de transmisión.

La importancia de esta estrategia es clave, ya que una inadecuada selección del regenerador conduce al fracaso en prestaciones de cualquier propuesta algorítmica en dos tramos.

Es recomendable que el algoritmo se aplique de modo “*off-line*” para cada par origen-destino posible, evitando retardo adicional.

Comparativa en prestaciones del algoritmo IABR-FFWA respecto al 1-CSP

El diseño del algoritmo IABR-FFWA ha sido satisfactorio respecto a las propuestas clásicas, en cuanto a la mejora de las prestaciones de red a alta velocidad y considerando las restricciones físicas. Son dos los factores que han permitido dichas mejoras:

- El algoritmo IABR-FFWA está dotado de una función de coste que realiza equilibrado de carga, además de considerar criterios de pérdida de OSNR.
- El algoritmo IABR-FFWA permite el uso de regeneradores de señal, ampliando el alcance. De esta manera, se garantiza una viabilidad de la malla fotónica a 40 Gbps.

Las mejoras cuantitativas obtenidas sobre el escenario Pacific Bell escalada por un factor 2, a 40 Gbps son las siguientes:

- La mejora en el retraso del primer bloqueo de petición es francamente importante, (un 3810.4%), para el algoritmo IABR-FFWA respecto a 1-CSP.
- La probabilidad de bloqueo también mejora de forma importante, aunque no tan intensa como en el caso anterior. En este caso el algoritmo IABR-FFWA mejora un 14.11% con respecto al 1-CSP.
- Y finalmente, la carga media de los enlaces en el estado final de red, aumenta un 7.25% mediante IABR-FFWA con respecto a 1-CSP, lo que representa un mayor aprovechamiento de los recursos desplegados.

6.3 Posibles líneas de Investigación futuras

1. Diseño de una estrategia PLIA-DRWA que resuelva de manera conjunta las estrategias de encaminamiento y asignación de longitud de onda con el objetivo de mejorar las prestaciones.
2. Estudio de la resolución del problema mediante algoritmia genética.
3. Consideración del impacto de ROADMs en simulación en tiempo real.
4. Incorporación de estrategias de asignación de longitud de onda para redes multifibra.
5. Incorporación de las recomendaciones ITU-T G.680 en cuanto a la formulación para la consideración de efectos físicos.
6. Consideración del concepto de grupos de riesgo de enlace, SRLG, en la estrategia de encaminamiento de la ruta principal y de protección.

APÉNDICE

Funciones implementadas mediante el Simulador

Funciones de coste

“*recalcula_coste_enlaces_lambda*”: función de coste dinámica que considera la carga de los enlaces.

“*recalcula_coste_enlaces_lambda_distancia_saltos*”: función de coste dinámica que considera la carga de los enlaces, un coste por el salto, y un coste por la distancia. Los pesos de cada criterio son configurables.

“*calcula_coste_OSNR*”: función de coste estática que considera la pérdida de OSNR.

“*recalcula_coste_enlaces_lambda_OSNR*”: función de coste dinámica que considera la carga de los enlaces, y un coste por la pérdida de OSNR. Los pesos de cada criterio son configurables. Es la función de coste utilizada en el algoritmo IABR-FFWA.

Funciones relacionadas con la topología de red

“*cargaRed_2009*”: función configurable que devuelve la topología de los enlaces correspondientes a la red seleccionada, sea la NSFNET o la Pacific Bell.

Funciones relacionadas con la demanda

“*cargaPeticones*”: devuelve el número solicitudes deseadas distribuidas de forma uniforme entre los nodos.

“*reordena_demandas*”: ordena aleatoriamente el conjunto de solicitudes dependiendo de una semilla aleatoria. Esta función permite realizar simulaciones con el mismo conjunto de la demanda en distinto orden para cada simulación.

“*generaPeticon*”: en cada iteración lee un par origen destino de la demanda.

Funciones relacionadas con el gestor de peticiones

“*cargaTiempoSimulacion*” : establece un tiempo máximo de simulación. Sobrepasado dicho tiempo, la simulación termina.

“*gestorPeticionesNominalBackup*” : Es un gestor de eventos. Recibe las solicitudes origen-destino y las características de transmisión y se encarga de gestionar el procesamiento de las solicitudes. Controla el cálculo de rutas, la comprobación de restricciones físicas y la asignación de recursos de red.

“*cargaEvento*” : genera eventos para su posterior planificación en tiempo. Su uso se indica cuando hay distintos tipos de eventos.

“*planifica_peticion*” : establece un orden temporal entre los eventos generados. Su uso se indica cuando se simula una distribución del proceso de llegada.

Funciones relacionadas con los recursos de red

“*libraryGraph_kshortestPath*” : calcula (“k”) caminos no congestionados para el par origen-destino.

“*comprueba_disponibilidad_lambda*” : comprueba si hay alguna longitud de onda disponible a través de una ruta, de forma que pueda cumplirse la restricción de continuidad. Si es así, devuelve la primera longitud de onda disponible (“FF”).

“*desasigna_recursos_red*” : esta función se requiere en el caso de que se soliciten caminos de protección. Si la ruta nominal estaba disponible y se asignó una longitud de onda para la petición, pero no hay recursos para el camino de protección, se ha tomado como criterio desasignar los recursos al camino nominal y descartar la petición. Esta función vuelve al estado anterior de la red en cuanto a la información de rutas establecidas.

“*desasigna_lambda*” : es el mismo caso que la función anterior. Esta función libera la longitud de onda ocupada por el camino nominal.

“*habilita_enlaces*” : es el mismo caso que la función anterior. Cuando un enlace está lleno se deshabilita para que no sea utilizado en el cómputo de rutas. Para volver a un estado anterior de red, se han de habilitar los enlaces de la ruta nominal, por si diera el caso de que alguno de ellos se hubiera deshabilitado debido a su llenado

“*asigna_recursos_red*” : incluye la nueva ruta bidireccional en las tablas de información de rutas.

“*asigna_lambda*” : asigna para todos los enlaces de la ruta, la longitud de onda que se obtuvo mediante FF, en la función “*comprueba_disponibilidad_lambda*”.

“*deshabilita_enlaces_llenos*”: en el caso de que alguno de los enlaces pertenecientes a la última ruta asignada esté lleno, se deshabilita mediante su asignación de un coste infinito.

“*encuentra_enlaces_inversos*”: encuentra los enlaces en la misma dirección y distinto sentido de la ruta nominal asignada, para deshabilitar estos enlaces en el caso de que sea requerida y no viable la asignación de un camino de protección.

Funciones relacionadas con las restricciones físicas

“*calcula_numero_vanos_enlace*”: obtiene el número de vanos en función de la longitud de vano y de la distancia de los enlaces.

“*calcula_OSNR_camino*”: permite determinar la OSNR de un camino o enlace en función del número de vanos del mismo, así como las características de transmisión.

“*calcula_PMD_camino*”: permite determinar la PMD de un camino en función del número de vanos del mismo, así como las características de transmisión.

“*comprueba_validez_OSNR_camino*”: determina si un camino es viable o no físicamente de acuerdo al criterio de OSNR en función del número de vanos y características de transmisión.

“*comprueba_validez_PMD_camino*”: determina si un camino es viable o no físicamente de acuerdo al criterio de PMD en función del número de vanos y características de transmisión.

“*calcula_maximo_numero_vanos_PMD_camino*”: Número de vanos máximos de acuerdo al criterio de PMD umbral.

“*calcula_maximo_numero_vanos_OSNR_camino*”: Número de vanos máximos de acuerdo al criterio de OSNR umbral.

“*carga_nodos_con_regeneradores*”: ordena los regeneradores disponibles según prioridad.

Funciones para Weathermap

“*obtener_paginas_html*”: script que llama al resto de funciones necesarias para representación gráfica.

“*genera_carga*”: recoge la información de estado de la carga en la red del simulador para su representación.

“*genera_info_links*”: genera un archivo .html por cada enlace, que contiene la información de los “*lightpaths*” establecidos sobre el mismo.

“*genera_info_lightpaths*”: genera un archivo .html con la información de los “*lightpaths*” asignados. Contiene la información de las rutas así como la longitud de onda asignada a cada “*lightpath*”.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Global IP Traffic Forecast and Methodology, 2006–2011” Cisco.
- [2] D. Benjamin, R. Trudel, S. Shew, E. Kus, Nortel Networks, “Optical Services over the Intelligent Optical Network”, IEEE Communications, September 2001.
- [3] J. P. Fernández-Palacios Giménez, O. González de Dios “Año 2015: una red todo óptica para los servicios del futuro” Artículo divulgativo. http://sociedadinformacion.fundacion.telefonica.com/seccion=1188&idioma=es_ES&id=2010040512130001&activo=4.do
- [4] Informe final sobre los resultados del modelo de despliegue de redes FTTH/GPON en España. ISCMTE-091856-1IL 17.02.2009.
- [5] Activación dinámica de circuitos ópticos en Red. Luís Pérez, Javier Jiménez, Telefónica I+D, Gerencia Protocolos y Núcleo de Red. Telecom I+D, 2007.
- [6] N. Gutiérrez Aller “Algoritmos de planificación de redes ópticas troncales” Proyecto fin de carrera, EPS, UAM, Madrid 2010.
- [7] C. A. Brackett, “Dense wavelength division multiplexing networks: Principles and applications” IEEE J. Select. Areas Comun., 8(6): 948-964, August 1990.
- [8] K. Bala, “The case for opaque multiwavelength lightwave networks” IEEE/LEOS Summer Topical Meeting, Keystone, Colorado, August 1995.
- [9] Concept Paper of DICONET D7.1, version: 1 Last update: December 24, 2008.
- [10] G. Ellinas, “Transparent optical switches: Technology issues and challenges”, Annual Review of Communications for the International Engineering Consortium (IEC), vol. 56, November 2003.
- [11] J. Livas, “Optical transmission evolution: From digital to analog to ? Network tradeoffs between optical transparency and reduced regeneration cost”. IEEE/OSA J. Lightwave Technology, 23(1): 219-224, 2005.

- [12] A. A. M. Saleh, "Defining all-optical networking and assessing its benefits in metro, regional and backbone networks". IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC), pages 410-411, Atlanta, GA, February 2003.
- [13] R. W. Tkach, E. L. Goldstein, J. A. Nagel, J. L. Strand, "Fundamental limits of optical transparency" IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC), San José, CA, February 1998.
- [14] B. Mukherjee, "WDM optical communication networks: Progress and challenges" IEEE J. Select. Areas Communication, 18(10): 1810-1824, 2000.
- [15] G. Ellinas, "Transparent optical switches: Technology issues and challenges" Annual Review of Communications for the International Engineering Consortium (IEC), vol 56, November 2003.
- [16] A. A. Akymaç, "Optical mesh networks modeling: Simulation and analysis of restoration performance". In Proceedings of the 18th Annual National Fiber Optic Engineerings Conference (NFOEC), Dallas, TX, September 2002.
- [17] S. Chaudhuri, E. Bouillet, G. Ellinas, "Addressing transparency in DWDM mesh survivable networks", IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC), Anaheim, CA, March 2001.
- [18] K. Papakos, M. Boduch, J. Larikova Tellabs "Optical Dynamic Core Networks: Design Implementation and Engineering Considerations". White Paper, Tellabs, 2009.
- [19] G. K. Chang, G. Ellinas, J. K. Gamelin, M. Z. Iqbal y C. A. Brackett, "Multiwavelength re-configurable WDM/ATM/SONET network testbed" IEEE/OSA J. Lightwave Technology, 14(6): 1320-1340, 1996.
- [20] R. Vodhanel, "National scale WDM networking demonstration by the MONET consortium" IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC), Dallas, TX, February 1997.
- [21] R. E. Wagner, R. C. Alferness, A. A. M. Saleh, M. S. Goodman, "MONET: Multiwavelength Optical Networking". IEEE/OSA J. Lightwave Technology, 14(6): 1349-1355, 1996.

- [22] S. Johansson, "A transport network involving a reconfigurable WDM network layer – A European demonstration" *IEEE/OSA J. Lightwave Technology*, 14(6): 1341-1348, 1996.
- [23] M. J. O'Mahony, "The design of a European optical network" *IEEE/OSA J. Lightwave Technology*, 13(5): 817-828, 1995.
- [24] T. Naito, "1 Terabits/s WDM transmission over 10,000 Km", *Proceedings European Conference on Optical Communications (ECOC)*, Nice, France, September 1999.
- [25] I. Tomkos, "80x10.7Gb/s ultra long-haul (+4200 km) DWDM network with reconfigurable broadcast and select OADMs" *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, Anaheim, CA, March 2002.
- [26] A. F. Wallace, "Ultra long-haul DWDM: Network economics" *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, Anaheim, CA, March 2001.
- [27] A. Prat, "40x10.7 Gb/s DWDM transmission over a meshed ULH network with dynamically reconfigurable optical crossconnects" *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, Atlanta GA, March 2003.
- [28] A. A. M. Saleh, "Transparent optical networking in backbone networks" *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, pages: 62-64, Baltimore, MD, February 2000.
- [29] J. M. Simmons, "On determining optical reach for a long-haul network", *IEEE/OSA J. Lightwave Technology*, 23(3): 1039-1048, 2005.
- [30] R. E. Wagner "The potential of optical layer networks" *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, Anaheim, CA, March 2001.
- [31] P. Charalambous, "A national mesh network using optical cross-connects switches", *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, Atlanta, GA, March 2003.
- [32] B. Cortez, "The emerging intelligent optical network: Now a reality", *IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC)*, pages: 224-225, Anaheim, CA, March 2002.

- [33] R. Ranganathan, L. Blair, J. Berthold, "Architectural implications of core grooming in a 46-node USA optical network", IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference, (OFC), pages: 498-499, Anaheim, CA, March 2002.
- [34] ITU-T Recommendation G.650.1 "Definition and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fiber and cable", June 2004. Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON), ITU-T Rec. G8090/Y.1304, Nov. 2001.
- [35] E. Mannie, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture" Technical Report RFC 3945, Internet Engineering Task Force (IETF), October 2004.
- [36] G. Bernstein, B. Rajagopalan, D. Saha, "Optical Network Control: Architecture, Protocols and Standards", Addison-Wesley, Reading, Mass., 2004.
- [37] I. Tomkos, S. Azodolmolky, M. Angelou, D. Kionidis, Y. Ye, C. V. Saradhi, E. Salvadori, A. Zanardi, R. Piesiewicz, "Impairment Aware Networking and Relevant Resiliency Issues in All-Optical Networks", ECOC 2008, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium.
- [38] L. Berger, "Generalized MPLS RSVP-TE Extensions" Internet Engineering Task Force (IETF), Technical Report RFC 3473, January 2003.
- [39] A. Jukan, "QoS-based Wavelength Routing in Multi-Service WDM Networks", Springer-Verlag, New York, 2001.
- [40] S. Azodolmolky, M. Klinkowski, E. Marin, D. Careglio, J. Solé I. Tomkos "A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks", Computer Networks, Volume 53, Issue 7 (May 2009) Pages 926-944.
- [41] A. Farrel, G. P. Vasseur, G. Ash "A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture", IETF RFC 4655, August 2006.
- [42] 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.
- [43] R. Martinez, C. Pinart, F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarenghi, P. Castoldi, L. Wosinska, J. Cornelias, and G. Junyent, "Challenges and requirements for

- introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON-GMPLSWDM networks,” IEEE Comm. Mag., vol. 44, no. 12, pp. 76-85, Dec. 2006.
- [44] F. Cugini, F. Paolucci, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, “Implementing a Path Computation Element (PCE) to encompass physical impairments in transparent networks,” Proc. of OFC/NFOEC 2007, pp. 1-3, Anaheim, CA, USA, Mar. 2007.
- [45] J. Strand, A.L. Chiu, “Impairments and Other Constraints in Optical Layer Routing”, RFC-4054, May 2005.
- [46] L. N. Binh, L. H. Binh, V. T. Tu, “Routing and Wavelength Assignment and Survivability of Optical Channels in Ultra-high Speed IP over DWDM Networks Under Constraints of Residual Dispersion and Nonlinear Effects”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 9, No. 2, February 2009.
- [47] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage y B. Mukherjee, “Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks” Journal of Lightwave Technology, vol. 17, No. 10, pp. 1713-1723, October 1999.
- [48] Simulador VPI. <http://www.vpihphotonic.com/VPIplayer>
- [49] Simulador OptSim <http://www.rsoftdesign.com/>
- [50] E. Iglesias Rodríguez, “Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad”, Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas (GSRCO), Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Enero 2009.
- [51] “Physical transfer functions of optical network elements”, ITU-T Recommendation G.680, July 2007.
- [52] M. Farahmand, D. Awduche, S. Tibuleac, y D. Atlas, “Characterization and Representation of Impairments for Routing and Path Control in All-Optical Networks”, Proc. Of National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC-2002), Dallas, USA, September 2002.

- [53] R. Cardillo, V. Curri y M. Mellia “Considering transmission impairments in configuring wavelength routed optical networks” *Optical Network Design and Modeling*, 2005. Conference on Volume , Issue , Feb. 7-9, 2005 Page(s): 421 – 429.
- [54] N. Zulkifli, y C. Okonkwo “Dispersion Optimised Impairment Constraint Based Routing and Wavelength Assignment Algorithms for All-Optical Networks”, *Proc. of ICTON 2006, Volume 3*, pp. 177-180, UK, 2006.
- [55] J. Strand “Issues For Routing in The Optical Layer”, *IEEE Communications Magazine*, February, 2001.
- [56] B. Mukherjee, Y. Huang, and J.P. Heritage, “Impairment-aware routing in wavelength-routed optical networks,” *Proc. of the 17th annual meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2004*, vol. 1, pp.428-429, Puerto Rico, USA, Nov. 2004.
- [57] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd Edition, Academic Press, 2001.
- [58] A. Marsden, A. Maruta y K. Kitayama, “Routing and Wavelength Assignment Encompassing FWM in WDM Lightpath Networks”, *Proc. Of IFIP ONDM 2008*, Spain March 2008.
- [59] A. Aguilar Morales “Comunicaciones Ópticas”. Tema 3. La fibra óptica. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2009. <http://arantxa.ii.uam.es/~aaguilar/ComOpt/TEMAS/Tema3.pdf>,
- [60] M. Wasfi, “Optical Fiber Amplifiers-Review” *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, vol. 1, No. 1, April. 2009.
- [61] Roy Blake “Sistemas Electrónicos de comunicaciones”. Editorial Thomson, 2^a Edición 2005.
- [62] Ivan P. Kaminow y Tingye Li. “Optical Fiber Telecommunications IV B Systems and Impairments”. Chapter 5. Academic Press, 2002.
- [63] H. Gnauck and R. M. Jopson, "Dispersion Compensation for Optical Fiber Systems," in *Optical Fiber Communications III A*, Ivan P. Kaminow and Thomas L. Koch, eds., pp. 162-195, Academic Press, San Diego, 1997.

- [64] A. Aguilar Morales “La fibra óptica, WDM”, Comunicaciones Ópticas”. Tema 2.
- [65] H. Sunnerud “A comparison between different PMD compensation techniques”. Journal of Lightwave Technology. Vol. 20 N°3, pp. 368-378. March, 2002.
- [66] J. P Gordon. “PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers”. PNAS. Vol. 97 N°9, pp. 4541-4550. April, 2000.
- [67] G. Van.Wiggeren, “Transmission of linearly polarized light through a single-mode fiber with random fluctuations of birefringence”. Applied Optics. Vol. 38 N°18, pp. 3888-3892, June, 1999.
- [68] “Encyclopedia of Laser Physics and Technology”. <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [69] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, 1989
- [70] F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, "Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems," Chapter 8, in Optical Fiber Telecommunications III A, eds. I. P. Kaminow and T. L. Koch, Academic Press, 1997.
- [71] Passmore, D., “Managing Fatter Pipes” Business Communications Review, August 2001, pp. 20-21.
- [72] Kaminov, I. P. and Koch, T. L. editors, Optical Fiber Telecommunications IIIA, Academic Press 1997.
- [73] M. A. Rebolledo, E. Bernabeu, J.M. Alvarez, J.M. López-Higuera, M. Andrés, F. Escribano, C. Domínguez, M. López-Amo, J. Pelayo, J. Capmany y W.Warzenskyj, “ Tecnologías fotónicas y comunicaciones ópticas” Óptica Pura y Aplicada –Vol 30. 1997.
- [74] G. Bellotti, A. Bertaina, S. Bigo, "Impact of residual dispersion on SPM-related power margins in 10 Gbit/s-based systems using standard SMF," Proc. ECOC '98, vol. 1, pp. 681-682, 1998.
- [75] Leonid G. Kazovsky, “OSNR status report 1994” para “Advanced Optical Communication Systems”. AD-A276 416.

- [76] I. Tomkos, A. Tzanakaki “Q-factor-based constraint routing improves performance in optical networks”, SPIE Newsroom, 2006.
- [77] D. Knipp, T. Chakma, Course: “Photonics and Optical Communication”, International University Bremen, 2005.
- [78] D. Gerstel y S. Kutten “Dynamic Wavelength Allocation in all-Optical Ring Networks”, Proc. IEEE ICC’97, Montreal, Quebec, Canada, vol. 1, pp. 432-436, June 1997.
- [79] H. Zang J.P Jue, B. Mulkherjee “A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks”, Optical Networks Magazine, January 2000.
- [80] R.E. Bellman. “On a routing problem”. Quarterly Applied Mathematics, 16:87–90, 1958.
- [81] N. M. Bhide, K. M. Sivalingam y T. Fabry-Asztalos, “Routing Mechanisms Employing Adaptative Weight Functions for Shortest Path Routing in Optical WDM Networks” Photonic Network Communications, vol. 3, no. 3, pp. 227-236, Jul. 2001.
- [82] S. Baroni, P. Bayvel, “Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 242-251, February 1997.
- [83] C. Assi, A. Shami, M.A. Ali, R. Kurtz, and D. Guo, “Optical networking and realtime provisioning: an integrated vision for the next-generation Internet”, IEEE Network, July/August 2001.
- [84] C. S. R Murthy and M. Gurusamy, “WDM Optical Networks (Concepts, Design and Algorithms)” Upper Sadle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2002, chapter 2.
- [85] X. Chu, B. Li, Z. Zhang, “A Dynamic RWA Algorithm in a Wavelength-Routed All-Optical Network with Wavelength Converters”, in 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2003, vol.3, pp. 1795-1804, March. 2003.
- [86] B. Li, X. Chu, K. Sohraby, “Routing and wavelength assignment versus wavelength converters placement in all-optical networks”, IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 8, pp. S22-S28, Aug. 2003.

- [87] S. Pachnicke, T. Paschenda y P. Krummrich, "Assessment of a constraint based routing algorithm for translucent 10 Gb/sec DWDM networks considering fiber nonlinearities", *Journal of Optical Networking*, vol 7, issue 4, p. 365, March, 2008.
- [88] A. Birman y A. Kershenbaum, "Routing and Wavelength Assignment Methods in Single-Hop All-Optical Networks with Blocking", *Proc, IEEE INFOCOM '95*, Boston, MA, vol. 2, pp. 431-438, April 1995.
- [89] K. Bala, T. E. Stem, and K. Bala, "Algorithms for routing in a linear lightwave network", *Proceeding of IEEE Infocom '91*, Miami, FL, April 1991.
- [90] H. Harai, M. Murata, and H. Miyahara, "Performance of Alternate Routing Methods in All-Optical Switching Networks", *Proceedings, IEEE Infocom 97*, Kobe, Japan, pp. 516-524, Apr. 1991.
- [91] S. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Fixed-Alternate Routing and Wavelength Conversion in Wavelength-Routed Optical Networks", *Proceedings, IEEE Globecom '98*, Sydney, Australia, pp. 2295-2302, Nov. 1998.
- [92] E. W. Dijkstra. "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische Mathematik*, 1: 269-271, 1959.
- [93] E. Q. Vieira Martins "An algorithm for Ranking Paths That May Contain Cycles", *European Journal of Operational Research*, 18, 123-130, 1984.
- [94] J. Y. Yen. "Finding the k shortest loopless paths in a network", *Management Science*, 17:712-716, 1971.
- [95] I. S Hwang y S.J. Luo, "Load Balance RWA Algorithm using Statistical Analysis in WDM Mesh Networks" *Int. J. Contemp. Math. Sci.*, Vol. 1, no. 10, 501-507, 2006.
- [96] J. Hamonangan Siregar, H. Takagi, Y. Zhang, "Efficient Routing and Wavelength Assignment in Wavelength-Routed Optical Networks", *APNOMS 2003*.
- [97] Subramaniam y R.A. Barry, "Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks", *Proc., ICC '97*, Montreal, Canada, vol. 1, pp.406-410, June 1997.

- [98] G. Jeong y E. Ayanoglu, "Comparison of Wavelength Interchanging and Wavelength-Selective Cross-Connects in Multiwavelength All- Optical Networks", Proc., IEEE INFOCOM '96, San Francisco, CA, vol. 1, pp. 156-163, March 1996.
- [99] E. Karasan y E. Ayanoglu, "Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 6, no. 2, pp.186-196, April 1998.
- [100] R.A. Barry y S.Subramaniam, "The MAX-SUM Wavelength Assignment Algorithm for WDM Ring Networks", Proc., OFC '97, Feb 1997.
- [101] X. Zhang y C. Qiao, "Wavelength Assignment for Dynamic Traffic in Multi-fiber WDM Networks", Proc., 7th International Conference on Computer Communications and Networks, Lafayette, LA, pp. 479-485, ICCCN'98, Oct. 1998.
- [102] J. Jaffe. "Algorithm for finding path with multiple constraints." Networks, 14: 95-116, 1984.
- [103] F. Forghieri, R. W Tkach, A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels," J. Lightwave Tech. 13, 889 (1995).
- [104] Awduche, D. O., Rekhter, Y., Drake, J., R. and Coltun, "Multi-Protocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects".
- [105] C. T. Politi, V. Anagnostopoulos, C. Matrakidis, A. Stavdas "Physical Layer Impairment Aware Algorithms based on Analytically Calculated Q-factor", Optical Society of America, 2006.
- [106] E. Modiano, A. Narula-Tam, "Survivable lightpath routing: a new approach to the design of WDM-based networks" IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol, 20, No. 4, May 2002.
- [107] W. Zhang, G. Xue, J. Tang, K. Thulasiraman, "Dynamic Wavelength Routing in WDM Networks under Multiple Signal Quality Constraints" Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008.
- [108] S. Siddiqui t, J. Wu t, H.T. Mouftah t, M. Savoie, "A dynamic k-routing algorithm in wavelength-routed optical networks" CCECE 2004 Niagara Falls, May 2004.

- [109] J. G. Proakis, *Digital communications*, McGraw-Hill, 1989.
- [110] I. Fonseca “Algorithms for FWM-aware routing and wavelength assignment”, MOC 2003.
- [111] J. E. Sierra, Y. Donoso “Wavelength Allocation strategies in WDM networks analyzing residual dispersion on Unicast/Multicast traffic with QoS”, *Revista Avances en Sistemas e Informática*, Vol.6, No.3, Diciembre 2009, ISSN 1657-7663.
- [112] T. Deng “Crosstalk-aware wavelength assignment in dynamic wavelength routed optical networks”, BROADNETS’04.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ALD Ad-hoc Lightpath Demands

AR Alternate Routing

ASE Amplified Spontaneous Emission

ASON Automatically Switched Optical Network

ASP Alternate-Shortest-Path

AW Available Wavelengths

BER Bit Error Rate

BF Best Fit

B-OSNR Best-OSNR

BP Blocking Probability

BW Bandwidth

CapEx Capital Expenditure

CD Chromatic Dispersion

CDT Conventional DisTance-based

CP Control Plane

CR-LDP Constraint-Based Label Distribution Protocol

CSP Constrained Shortest Path

dB decibelios / decibels

dBm milidecibelios

DBPP Dedicated Backup Path Protection

DCF Dispersion Compensation Fiber

DCM Dispersion Compensation Module

DGD Differential Group Delay

- DLD** Dynamic Light-path Demand
- DLE** Dynamic Light-path Establishment
- DOIC** Dispersion Optimised Impairment Constraint-based RWA
- DPSK** Differential Phase Shifting Keying
- DQPSK** Differential Quadrature Phase Shifting Keying
- DR** Dynamic Routing
- DRCL** Distributed Relative Capacity Loss
- DRWA** Dynamic Routing and Wavelength Assignment
- DW** Distance-Weight
- DWDM** Dense-Wavelength Division Multiplexing
- EDFA** Erbium Doped Fiber Amplifiers
- EMI** Electro-magnetic Interference
- EMS** Element Management System
- ERM** Equivalent Random Method
- E2E** Extreme to Extreme
- FAR** Fixed-Alternate Routing
- FASP** Fixed-Alternate-Shortest-Path
- FC** Filter Concatenation
- FEC** Forward-Error Correction
- FF** First-Fit
- FR** Fixed Routing
- FSP** Fixed-Shortest-Path
- FTTH** Fiber To The Home
- FWM** Four-Wave-Mixing
- GA** Genetic Algorithm
- GAC** Automatic Gain Control

GMPLS Generalized Multi Protocol Label Switching

GPON Gigabit-capable Passive Optical Network

GVD Group-Velocity Dispersion

HA Heuristic Algorithm

HAW Hop Count and Available Wavelengths

HPLD Heaviest Path Load Deviation

HTAW Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths

HW Hop-Weight

JWRS Joint Wavelength-Route Selection

IA Impairment Aware

IA-BP Impairment Aware Best Path

IABR Impairment Aware Based Routing

IABR-FFWA Impairment Aware Based Routing – First-Fit Wavelength Assignment

IA-FF Impairment Aware First Fit

IA-RWA Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment

IC Integrated Circuit

ICBR Impairment Constraint Based Routing

IEC International Engineering Consortium

ILA In-Line Amplifier

ILP Integer Linear Programming

IP Internet Protocol

ISI Intersymbol Interference

ISP Internet Service Provider

LBRWA Load Balance RWA

LCOS Liquid Crystal on Silicon

LCPR Least Congested Path Routing

LH Long-Haul

LL Least-Loaded

LLR Least Loaded Routing

LMP Link Management Protocol

LR Long Reach

LSA Link State Advertisement

LSP Label Switched Path

LU Least-Used

MAN Metropolitan Area Network

MC Min-Crosstalk

MDP Markov Decision Process

MEMS Micro – Electro – Mechanical Systems

MFC Modified Future Cost

MONET Multiwavelength Optical Networking

MP Minimum-Product

MS Minimum-Sum

MSL Minimum Shared Links

MSPP Multi-Service Provisioning Platforms

MSR Minimum Sum Routing

MTWN Multiwavelength Transport Network

MU Most-Used

M_{Σ} Maximum-Sum

N Noise

NDP Neighbor Discovery Protocol

NE Network Element

NF Noise Figure

NFOEC National Fiber Optic Engineering's Conference

NMS Network Management System

NRZ Non Return to Zero

n refraction index

NZDSF Non-Zero Dispersion Shift Fiber

OA Optical Amplifier

OC Optical Carrier

OCC Optical Connection Controller

OEO Optical-Electronic-Optical

ONE Optical Network Element

ONTC Optical Network Technology Consortium

OpEx Operation Expenditure

OPM Optical Performance Monitoring

OSNR Optical to Signal Noise Ratio

OSPF Open Shortest Path First

OSPF-TE Open Shortest Path First Traffic Extension

OTN Optical Transport Network

OXC Optical Cross Connect

P_B Blocking Probability

PCE Path Computation Element

PDL Polarization Dependent Loss

PLD Permanent Lightpath Demands

PLI-DRWA Physical Layer Impairment – Dynamic Routing and Wavelength Assignment

PLI-RWA Physical Layer Impairment – Routing and Wavelength Assignment

PLIA-DR Physical Layer Impairment Aware Dynamic Routing

PLIA-RWA Physical Layer Impairment Aware – Routing and Wavelength Assignment

- PLIC-DR** Physical Layer Impairment Constraint - Dynamic Routing
- PLIC-RWA** Physical Layer Impairment Constraint – Routing and Wavelength Assignment
- PLID** Physical Layer Impairment Database
- PON** Passive Optical Network
- PMD** Polarization Mode Dispersion
- PN** Photonic Network
- POLMUX** Polarization - Multiplexing
- P2P** Peer to Peer
- QoS** Quality of Service
- QoT** Quality of Transmission
- R** Random
- RA** Raman Amplifier
- RCL** Relative Capacity Loss
- RD** Residual Dispersion
- ROADM** Reconfigurable optical add-drop multiplexer
- RR** Round-Robin
- Rsv** Wavelength Reservation
- RSVP** Resource Reservation Protocol
- RSVP-TE** Resource Reservation Protocol - Traffic Extension
- RWA** Routing and Wavelength Assignment
- SBPP** Shared Backup Path Protection
- SBS** Stimulated Brillouin Scattering
- SDH** Synchronous Digital Hierarchy
- SIR** Source Initiated Reservation
- SLA** Service Level Agreement
- SLD** Scheduled Lightpath Demands

SLE Static Lightpath Establishment

SMF Single Mode Fiber

SNR Signal to Noise Ratio

SONET Synchronous Optical Network

SOPs States of Polarization

SP Shortest-Path

SPM Self-Phase Modulation

SRLG Shared Risk Link Group

SRS Stimulated Raman Scattering

SWP Shortest-Widest Path

TAW Total Wavelengths and Available Wavelengths

TED Traffic Engineering Database

Thr Protecting Threshold

ULH Ultra-long-haul

UNI User Network Interface

VPN Virtual Private Network

WA Wavelength Assignment

WC-XT Worst-case Crosstalk

WDM Wavelength Division Multiplexing

WRN Wavelength Routed WDM Networks

WRON Wavelength Routed Optical Networks

WSON Wavelength Switched Optical Networks

WSS Wavelength Selective Switch

XPM Cross-Phase-Modulation

XT Crosstalk

λ_A Available Wavelength

λ_{NA} Non Available Wavelength

3R Regeneration, Retiming and Reshaping

PRESUPUESTO

1. Ejecución Material

- Adquisición de ordenador personal.....700,00 €
- Software necesario3000,00 €
- Material de oficina 100,00 €
- Total de ejecución material3.800,00 €

2. Gastos generales

- 18 % sobre Ejecución Material608,00 €

3. Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material228,00 €

4. Honorarios Proyecto

- 1056 horas a 15 € / hora15840,00 €

5. Material fungible

- Gastos de impresión80,00 €
- Encuadernación200,00 €

6. Base imponible del presupuesto

- Subtotal Presupuesto19920,00 €

7. I.V.A. aplicable

- 18% Subtotal Presupuesto.....3187,20 €

8. Total presupuesto

- Total Presupuesto23107,20 €

Madrid, Octubre de 2010

La Ingeniera Jefe de Proyecto

Fdo.: Sara Lázaro Olavide

Ingeniera Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este apartado contiene las condiciones legales que guiarán la realización de este proyecto: *Evaluación de prestaciones de algoritmos RWA para redes todo ópticas WDM en tiempo real, considerando restricciones físicas*. 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.