

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy
alta velocidad**

Enrique Iglesias Rodríguez

Enero 2009

Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad

AUTOR: Enrique Iglesias Rodríguez
TUTOR: Antonio Aguilar Morales

Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas (GSRCO)
Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Enero 2009

Resumen:

En este proyecto se estudia las prestaciones de la transmisión sobre fibra óptica a muy altas velocidades, en concreto a 40Gbps y 100Gbps. Para la transmisión a estas velocidades se hace uso de nuevos formatos de modulación (novedosos en las comunicaciones ópticas) como son DQPSK y DP/QPSK o POLMUX. Factores importantes que afectan a la transmisión son: características de la fibra (atenuación, dispersión cromática y PMD), características de transmisión (formato de modulación, banda espectral, N° de canales y separación entre canales), características de los elemento de red (amplificadores ópticos, filtros ópticos y módulos compensadores de la dispersión) y características del receptor (ruidos)

Para estudiar los distintos casos se ha hecho uso del simulador VPI transmission maker de la empresa VPI photonics.

Palabras clave:

100Gbps, 40Gbps, Ópticas, PMD, CD, DQPSK, POLMUX, DP-QPSK, VPI transmission maker, Alta Velocidad.

Abstract:

In this Project, transmission of high speed signals over optics is studied. Specifically, 40Gbps and 100Gbps. For this purpose, new modulation formats (never used before in optics) as DQPSK and DP/QPSK-POLMUX are used. Important factors that affect transmission are fiber characteristics (attenuation, chromatic dispersion and polarization mode dispersion), transmission characteristics (modulation format, spectral band, number of channels and channel spacing), characteristics of network elements (optical amplifiers, optical filters, and dispersion compensation modules) and finally receiver characteristics (noises).

VPI transmission maker simulator, from the VPI photonics German company, has been used in order to accomplish this work.

Keywords:

100Gbps, 40Gbps, Optics, PMD, CD, DQPSK, POLMUX, DP-QPSK, VPI transmission maker, High Speed.

Agradecimientos

A MI TUTOR, ANTONIO AGUILAR MORALES, POR LA OPORTUNIDAD QUE ME DIO AL PROPONERME ESTE PROYECTO Y POR SU GRAN APOYO Y DEDICACIÓN EN TODA LA REALIZACIÓN DEL MISMO.

A BAZIL TAHA AHMED, POR SU CONSTANTE AYUDA A LO LARGO DEL PROYECTO.

A FRAN Y RAÚL, DE TELEFÓNICA, POR EL TRABAJO REALIZADO Y LOS BUENOS MOMENTOS.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS: HÉCTOR CABREJAS, JOSÉ CANÓS, MIGUEL GARCÍA LÓPEZ, MANUEL GONZÁLEZ TEJERINA, JUAN IGLESIAS, NICO IGLESIAS, GUILLERMO LÓPEZ-OLIVA, FELIPE MATA, GONZALO POLO, PORQUE ME CAEN BIEN, POR SU APOYO Y POR TODOS LOS PITIS QUE NOS HEMOS FUMADO SENTADOS, MIRANDO AL CIELO, ESPERANDO ACABAR, QUIZÁS, ALGÚN DÍA.

A MIS PADRES, POR LEVANTARME DE LA CAMA, POR AGUANTARME, POR AYUDARME, Y POR MUCHAS COSAS MÁS.

A MI ABUELO, POR SER COMO ES.

A MI HERMANO, POR SER QUIEN YO QUIERO SER DE MAYOR.

A ELLA, QUE LE DA SENTIDO A TODO, INCLUSO A ESTO.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	4
2	Estado del arte.....	5
2.1	Necesidades Actuales.....	5
2.2	Posibles Soluciones.....	8
3	Dispersión Cromática y PMD.....	10
3.1	Dispersión Cromática.....	10
3.1.1	Fundamentos.....	10
3.1.2	Soluciones.....	11
3.2	Dispersión por el modo de Polarización (PMD).....	13
3.3	Comparación del efecto de la CD y la PMD sobre distintas tasas binarias.....	15
4	Formatos de modulación.....	16
4.1	DQPSK.....	18
4.1.1	Fundamentos.....	18
4.1.2	Implementación.....	19
4.2	POLMUX/DP-QPSK.....	20
4.2.1	Fundamentos.....	20
4.2.2	Implementación.....	21
5	ROADMs.....	22
5.1	Definición.....	22
5.2	Implementación.....	26
6	VPI transmission maker.....	29
6.1	Estructura.....	30
6.2	Funcionalidades.....	32
6.3	VPI photonics analyzer.....	33
6.4	Módulos principales utilizados.....	34
7	Integración, pruebas y resultados.....	36
7.1	Consideraciones previas.....	36
7.1.1	Parámetros de Simulación.....	39
7.2	DQPSK.....	42
7.2.1	Pruebas.....	42
7.2.2	Escenarios.....	43
7.2.3	Resultados.....	49
7.2.3.1	Alcance sin ROADM.....	49
7.2.3.2	Simulaciones con ROADMs equiespaciados.....	53
7.2.3.3	Variación de la posición de los ROADMs I.....	57
7.2.3.4	Variación de la posición de los ROADMs II.....	63
7.2.3.5	Compensación de la dispersión cromática en recepción.....	70
7.3	POLMUX.....	73
7.3.1	Consideraciones previas.....	73
7.3.2	Pruebas.....	73
7.3.3	Resultados.....	74
7.3.3.1	Máximo alcance sin ROADMs.....	74
7.3.3.2	Compensación de la dispersión cromática en recepción.....	76

8 Conclusiones y trabajo futuro.....	78
8.1 Conclusiones.....	78
8.1.1 DQPSK.....	79
8.1.1.1 Máximo Alcance sin y con ROADM.....	79
8.1.1.2 Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.....	83
8.1.1.3 Estudio de la variación de la posición de los ROADMs.....	85
8.1.2 POLMUX.....	86
8.1.2.1 Máximo Alcance sin ROADM.....	86
8.1.2.2 Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.....	86
8.1.3 DQPSK vs POLMUX.....	88
8.2 Trabajo futuro.....	91
Referencias.....	93
Glosario.....	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los enlaces.....	3
Figura 2. Gráfica deseada: ROADM vs Distancia.....	3
Figura 3. Crecimiento del tráfico IP estimado para 2001.....	5
Figura 4 Efecto de la dispersión cromática.....	11
Figura 5 Efecto de la PMD.....	15
Figura 6 Evolución de los formatos de evolución para la reducción de la velocidad de símbolo.....	16
Figura 7 Posibles formatos de modulación según su complejidad electrónica-fotónica.....	17
Figura 8 Diagrama de símbolos de la modulación DQPSK.....	18
Figura 9 Elementos de un transmisor DQPSK.....	18
Figura 10 Comparación de espectros ópticos: NRZ, NRZ-DQPSK, 50% RZ-DQPSK.....	19
Figura 11 Diagrama de símbolos de la modulación DP-QPSK.....	20
Figura 12 Elementos de un transmisor DP-QPSK.....	20
Figura 13 Estructura de un receptor DP-QPSK.....	21
Figura 14 Esquema funcional de un ROADM.....	22
Figura 15 Comparación de la respuesta de los distintos tipos de filtro.....	23
Figura 16 Comparación de las prestaciones de las distintas tecnologías de filtrado.....	24
Figura 17 Estimación de la presencia de ROADM en los sistemas ópticos.....	24
Figura 18 Equipo de red donde pueden observarse los amplificadores, los ROADM y los transponders.....	25
Figura 19 Esquema funcional de un ROADM.....	26
Figura 20 ROADM como 2 WSS en cascada.....	27
Figura 21 ROADM como 4 AWG.....	27
Figura 22 Implementación del modelo del ROADM en VPI.....	28
Figura 23 Esquema general del entorno de simulación.....	30
Figura 24. Captura de pantalla del simulador.....	30
Figura 25 Captura de pantalla de VPI photonics analyzer.....	33
Figura 26 Estructura básica de las simulaciones con ROADM.....	36
Figura 27 Nodos de Red.....	37
Figura 28 Ber y FEC.....	41
Figura 29 Escenario Multi_DQPSK_sinROADM7canales.....	43
Figura 30 Medida del Alcance con VPI photonics analyzer.....	44
Figura 31 Escenario Multi_DQPSK_ROADM7canales.....	45
Figura 32 Escenario posición_ROADM_7canales.....	46
Figura 33 Esquema ROADM en VPI.....	46
Figura 34. Escenario distanciaentreROADMs.....	47
Figura 35 POLMUX como suma de dos flujos DQPSK.....	73
Figura 36 Comparación de los alcances máximos a 40G con y sin ROADM.....	80
Figura 37 Comparación de los alcances máximos a 100G con y sin ROADM.....	81
Figura 38 Alcance en vanos compensando en recepción y en línea para 40G.....	83
Figura 39 Alcance en vanos compensando en recepción y en línea para 100G.....	84
Figura 40 Mejora debida a la compensación de la CD en recepción para 8 y 16 canales....	86
Figura 41 Mejora debida a la compensación de la CD en recepción para 32 y 64 canales..	87
Figura 42 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 8 canales.	88
Figura 43 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 16 canales	88
.....	88

Figura 44 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 32 canales	89
Figura 45 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 64 canales	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación del efecto de la CD, la DGD y la PMD sobre distintas tasas binarias	15
Tabla 2. Relación de potencias por canal para los distintos esquemas	38
Tabla 3 Ancho de banda óptimo de filtrado para 40G	38
Tabla 4. Ancho de banda óptimo de filtrado para 100G	39
Tabla 5 Ganancia del segundo amplificador del ROADM	48
Tabla 6. DQPSK, sin ROADM, 40G, 8 canales	49
Tabla 7. DQPSK, sin ROADM, 100G, 8 canales	49
Tabla 8. DQPSK, sin ROADM, 40G, 16 canales	50
Tabla 9. DQPSK, sin ROADM, 100G, 16 canales	50
Tabla 10. DQPSK, sin ROADM, 40G, 32 canales	51
Tabla 11. DQPSK, sin ROADM, 100G, 32 canales	51
Tabla 12. DQPSK, sin ROADM, 40G, 64 canales	52
Tabla 13. DQPSK, sin ROADM, 100G, 64 canales	52
Tabla 14. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 8 canales	53
Tabla 15. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 8 canales	53
Tabla 16. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 16 canales	54
Tabla 17. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 16 canales	54
Tabla 18. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 32 canales	55
Tabla 19. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 32 canales	55
Tabla 20. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 64 canales	56
Tabla 21. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 64 canales	56
Tabla 22. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 100G	64
Tabla 23. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 40G	64
Tabla 24. Alcance en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 100G	65
Tabla 25 Alcance en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 40G	65
Tabla 26. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 8 canales, 100G	66
Tabla 27. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 8 canales, 40G	66
Tabla 28. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 16 canales, 100G	67
Tabla 29. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 16 canales, 40G	67
Tabla 30. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 32 canales, 100G	68
Tabla 31. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 32 canales, 40G	68
Tabla 32. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 64 canales, 100G	69
Tabla 33. . BER en la variación de la posición de los ROADMs, 64 canales, 40G	69
Tabla 34. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 8 canales, 40G	70
Tabla 35. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 8 canales, 100G	70
Tabla 36. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 32 canales, 40G	71
Tabla 37. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 32 canales, 100G	71
Tabla 38. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 64 canales, 40G	72
Tabla 39. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 64 canales, 100G	72
Tabla 40. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 8 canales	74
Tabla 41. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 16 canales	74

Tabla 42. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 32 canales.....	75
Tabla 43. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 64 canales.....	75
Tabla 44. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 8 canales.....	76
Tabla 45. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 16 canales.....	76
Tabla 46. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 32 canales.....	77
Tabla 47. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 64 canales.....	77
Tabla 48 Comparación de los máximos y mínimos alcances con y sin ROADM.....	79

1 Introducción

1.1 Motivación

En el presente documento, se expone el trabajo realizado para el estudio de la transmisión sobre fibra óptica a muy alta velocidad, haciendo uso de nuevos formatos de modulación y diversas técnicas de compensación de la dispersión. El proyecto se ha realizado en colaboración con Telefónica I+D.

En este proyecto se ha hecho uso de un simulador de comunicaciones ópticas que nos ha permitido establecer los escenarios adecuados para más adelante extraer resultados. Este simulador ha sido 'Vpi Transmission Maker 7.0' de la empresa 'VPI systems'.

A lo largo de la memoria, se expondrán los distintos escenarios creados así como breves explicaciones teóricas sobre los factores que influyen en los mismos.

Cada escenario representa un enlace punto a punto donde las señales ópticas generadas en sus respectivos Transmisores Ópticos atraviesan un número de elementos concatenados y finalmente son detectados en los correspondiente Receptores Ópticos. Los elementos concatenados están constituidos por fibra óptica, módulos de compensación de dispersión, amplificadores ópticos y filtros ópticos.

El estudio y los resultados obtenidos se han basado en los requisitos definidos por Telefónica I+D, con cuyos participantes se ha mantenido una permanente y fructífera comunicación. En todas las simulaciones se ha tratado de dotar a los escenarios de características reales de la red actual.

El parámetro comparativo entre los distintos escenarios se ha decidido utilizar es la Tasa de Error a partir de ahora BER (Bit Error Rate), que mide el número de bits incorrectamente recibidos con respecto al total de bits enviados durante un intervalo.

Otro parámetro de medida establecido es el alcance, que se define como la longitud máxima del enlace para la cual se obtiene un valor de BER mínimo definido. Este valor se ha establecido como 10^{-4} . Este valor se considera adecuado cuando se implementan adicionalmente técnicas de corrección de errores (FEC).

Los formatos a modulación que se han utilizado han sido Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) y dual polarization quadrature phase shift keying (DP-QPSK o POLMUX). Estos dos formatos de modulación representan 2 y 4 bits por símbolo respectivamente.

En cuanto a la tasa binaria de transmisión se han realizado pruebas en ambos formatos de modulación a 40Gbps y a 100Gbps, valores de los sistemas en desarrollo.

1.2 Objetivos

Como se expone mas adelante, nos encontramos en un momento en el que las redes evolucionan de forma muy rápida. La demanda de tráfico está aumentando de tal modo que pronto requerirá un salto generacional.

Los formatos de modulación de los sistemas actuales, hasta 10 Gbps, basados en Modulación de Intensidad y NRZ, no son validos para velocidades de transmisión más altas sobre fibras ópticas instaladas en la planta existente.

En este proyecto se estudia principalmente cual debe ser el formato de modulación más adecuado y por qué. Como se verá más adelante cada opción tiene sus ventajas.

Otro factor a tener en cuenta en todo esto es la planta de fibra. Es decir, si se quiere transmitir a muy altas velocidades con la planta de fibra actual seguramente haya que invertir más en equipamiento. Por otro lado, otra opción sería renovar, parte o la totalidad de la fibra actual con objeto de mejorar las prestaciones.

Otro elemento objeto de este estudio es el uso de compensación de dispersión cromática en recepción. Lo que se ha tratado es de estudiar cuanta es la mejora al introducir este tipo de equipos en lugar de compensar en línea.

Como se puede observar, es un problema que implica muchos factores. A lo largo de este estudio se ha tratado de estudiar cada uno de ellos por separado y ver cuál es su aportación.

El objetivo que se persigue con el presente proyecto de simulaciones es **analizar el alcance máximo** que se puede conseguir en un enlace de comunicación sobre **transmisión todo-óptica**.

Con este fin, se analizará el efecto conjunto de los siguientes factores:

- **Características del transmisor:** formatos de modulación DQPSK y DP-QPSK.
- **Características de la/s fibra/s que atraviesa el enlace óptico:** dispersión cromática, dispersión por el modo de polarización, atenuación y efectos no lineales.
- **Características y número de nodos atravesados:** ROADM en cascada.
- **Características del receptor:** sensibilidad y capacidad de corrección de errores (técnicas FEC).

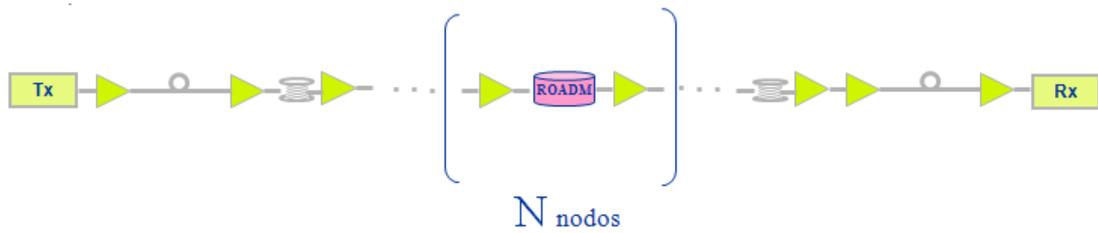


Figura 1. Esquema de los enlaces

A partir de la caracterización de los elementos del nodo y de la red, el resultado del estudio llevaría a la elaboración de gráficas parametrizadas.

Estas gráficas serán la base sobre la cual establecer criterios de diseño para la malla fotónica de Telefónica.

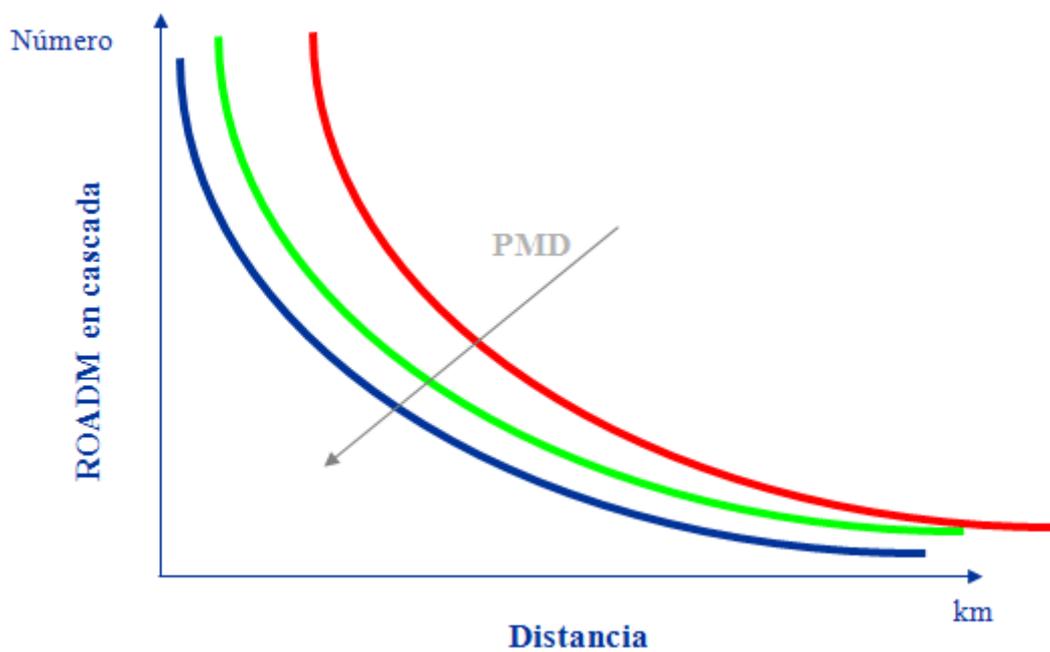


Figura 2. Gráfica deseada: ROADM vs Distancia

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

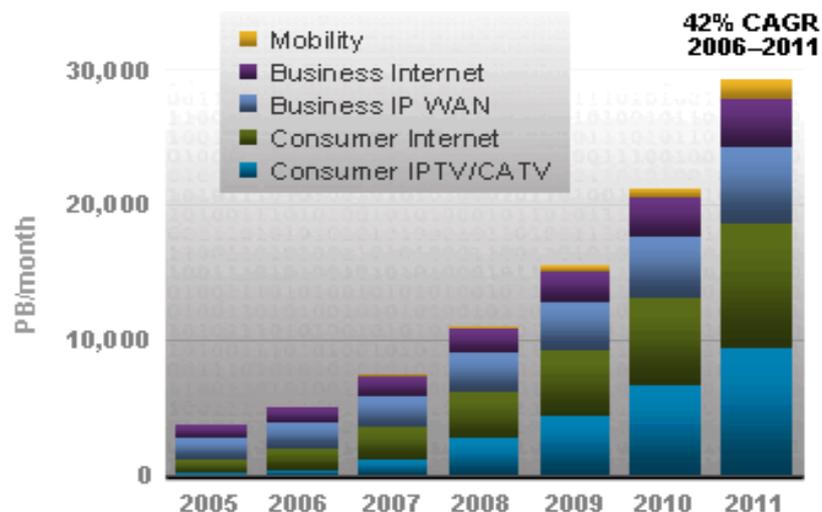
- **Estado del arte**, donde se exponen el estado de las redes actuales y su posible evolución. Además se exponen las posibles soluciones al crecimiento de la red.
- **Dispersión cromática y PMD**, donde se explican estos fenómenos y se plantean las posibles soluciones a los mismos.
- **Formatos de Modulación**, donde se estudian los principales formatos de modulación multinivel a utilizar, en concreto: DQPSK y POLMUX.
- **ROADMs**, donde se explica la base y funcionamiento de los Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers y se expone su implementación en VPI.
- **VPI transmission maker**, donde se explica el funcionamiento básico del simulador y se exponen sus principales funcionalidades.
- **Integración, pruebas y resultados**, en este capítulo se aborda el plan de simulación, y a continuación se muestran los resultados obtenidos en las distintas pruebas.
- **Conclusiones y trabajo futuro**, finalmente en este capítulo se expresan las conclusiones extraídas de los resultados y se hace una valoración de cual podría ser el trabajo futuro a acometer.

2 Estado del arte

2.1 Necesidades Actuales

[3], [11]. La transformación de las redes de transporte está ocasionada en gran medida por los nuevos servicios de banda ancha ofrecidos por los operadores, como por ejemplo los servicios “triple play” que conforman en un paquete único los servicios de Video (VoD e IPTV), Voz e Internet, los servicios de almacenamiento SAN (Storage Area Network) o, próximamente, servicios para comunidades o juegos en red que están teniendo una acogida espectacular en el mercado asiático. Para hacer una estimación del tráfico futuro se pueden hacer unos supuestos rápidos. Por ejemplo, si el 30% de los abonados usasen algún tipo de servicio de VoD/IPTV en el año 2010 significaría un crecimiento factor 2 comparado al 14% de abonados que utilizaban este tipo de servicios en 2005, pero si además consideramos una mejora de calidad en la señal de video que pasaría de video de baja calidad con 2-3Mb/s a unos 15Mb/s (velocidad media de video streaming estimada para el año 2010), significa un factor 5 de crecimiento. Según este supuesto el tráfico multimedia crecería por un factor 10 hasta el 2010.

Global IP Traffic Growth



Source: Cisco, 2007

Figura 3. Crecimiento del tráfico IP estimado para 2011

También es reseñable la creciente demanda de capacidad por las redes empresariales así como organizaciones públicas, sanitarias y científicas. Para conseguir ofrecer estos nuevos servicios a los abonados con la calidad deseada es necesaria una red de banda ancha tanto sobre una infraestructura de acceso fijo como en la móvil. Existen nuevas

tecnologías de acceso que permiten incrementar la capacidad por abonado en la red fija, como por ejemplo mediante nodos de acceso multiservicio (MSAN) que dispongan de líneas VDSL/VDSL2 (Very High Speed Digital Subscriber Line), redes ópticas pasivas (PON) como GPON, etc., o en el acceso móvil con tecnologías como HSPA (High Speed Packet Access), WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) o en un futuro más lejano el LTE (Long Term Evolution) que aumentará el ancho de banda por abonado a velocidades próximas a los 100Mb/s descendente y 30Mb/s ascendente. Con esta revolución de servicios y tecnologías en el acceso fijo y móvil, se hace imprescindible una transformación en la red de transporte con objeto de agregar y transportar este nuevo tráfico.

Existen diferentes tendencias más ó menos disruptivas de evolución de una red clásica basada en circuitos a redes de transporte optimizadas para tráfico de datos, en los que hoy en día se basa todo nuevo servicio. Como la mayoría del tráfico en la red es Ethernet y como los “routers” IP son recursos costosos (CAPEX), se están discutiendo diferentes arquitecturas que permitan combinar las ventajas de los conceptos de transmisión de paquetes con funcionalidades propias de las redes SDH o ATM tradicionales. Muchas de estas nuevas tecnologías se encuentran bajo discusión constante y muy especialmente las tecnologías de nivel 2 como son PBB-TE (Provider Backbone Bridging-Traffic Engineering) y T-MPLS (Transport Multiprotocol Label Switching) que han sido desarrolladas para promocionar la flexibilidad, predictibilidad, así como servicios Ethernet orientados a conexión con la calidad exigida por los operadores para el transporte. Estas nuevas tecnologías deben también aportar una alta capacidad de transmisión 10Gb/s, 40Gb/s y 100Gb/s a un coste razonable. La arquitectura de red óptica futura consistirá en una mezcla razonable de equipos de transmisión de paquetes y equipos de transporte orientados a conexión entre el acceso, metro, red troncal para permitir conexiones extremo a extremo así como dentro de cada área concreta.

Actualmente parece existir un consenso a favor de implementar IP/MPLS en la red troncal, aunque esta solución no estaría optimizada para el tráfico requerido por los nuevos servicios. Una aproximación de Ethernet extremo a extremo apoyada en una red óptica mallada DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) simplificaría la arquitectura. Esta combinación supone una reducción considerable en complejidad y permite una operación de la red más sencilla ya que si observamos las arquitecturas desplegadas se comprobaría que muchas funcionalidades se implementan repetidamente en las diferentes capas. Tampoco sería razonable conectar las diferentes estaciones únicamente mediante la capa DWDM ya que significaría una estructura totalmente mallada que no estaría optimizada y el número de adyacencias en los “routers” excedería los límites y causaría problemas operativos.

Pero no hay duda de que en todas las áreas estará presente la tecnología óptica WDM permitiendo multiplexar a nivel óptico los diferentes servicios y transportarlos a largas distancias de forma económica sin necesidad de regenerar eléctricamente la señal y

minimizando los recursos de fibra necesarios. Las redes WDM se utilizan tanto en la capa de acceso y agregación con soluciones WDM metropolitanas así como en la capa troncal para transportar los servicios provenientes de los “routers” a largas distancias en el dominio puramente óptico. Pero la frontera entre las redes de larga distancia y metropolitanas se hace cada vez más borrosa y desaparecerá finalmente con los nuevos sistemas DWDM multi-alcance que ofrecen una mayor capacidad, una mayor automatización y permite la conmutación a nivel óptico mediante ROADM (Reconfigurable Optical Add/dropp Multiplexer) y PXC (Pure Optical Crossconnect) a un precio mucho más reducido. Por este motivo sistemas WDM multi-alcance parece la opción más adecuada para la red ofreciendo a los operadores la mayor flexibilidad a un precio razonable. Los operadores dominantes más importantes han empezado a desplegar interfaces a 40Gb/s (STM-256/OTU-3) en sus “routers” troncales debido a las altas demandas de tráfico. Las interfaces de alta capacidad integrada en estos “routers” troncales, Ej. Juniper (T-640) ó Cisco (CSR-1), sólo incorporan interfaces de corta distancia capaces de abordar pocos kilómetros y por ello es necesario el uso de tecnología WDM para extender el alcance y realizar conexiones interprovinciales o de larga distancia. Las solución con interfaces nativos a 40Gb/s presentan frente a una soluciones equivalentes basadas en agregación de interfaces 10Gb/s que cursan el mismo tráfico ventajas como una mayor eficiencia, un menor número de interfaces, menos cableado así como un mantenimiento más sencillo.

Una buena razón para desplegar interfaces de mayor ancho de banda en la red es evitar cuellos de botella. En un estudio muy reciente del Amstendam Internet Exchanged (AMS-IX) presentado en el ECOC 2007 se muestran cifras de las demandas de tráfico en su red, teniendo ya picos de tráfico de 305Gb/s. También han analizado las estadísticas de tráfico desde 1998 mostrando un crecimiento exponencial y estimado las necesidades futuras. La presentación concluye que la indisponibilidad de una interfaz Ethernet de nueva generación (por ejemplo: 100GbE) provocará que el número de puertos 10GbE en las plataformas crezca probablemente de forma exponencial junto al tráfico.

Actualmente, dentro del IEEE 802.3 Higher-Speed Study Group, se está estandarizando una nueva interfaz 100GbE, evolución natural del 10GbE ampliamente utilizado por operadores y empresas. Además el ITU-T se está encargando de la estandarización del transporte de larga distancia en el grupo de estudio 15. La transmisión Ethernet extremo a extremo a 100GbE podría volverse una realidad en el 2010. Esta evolución supone el reto de fabricar interfaces con velocidades de 100Gb/s y sistemas WDM capaces de interconectarlos a largas distancias estos servicios. Esta velocidad supera ampliamente la utilizada en los sistemas WDM disponibles comercialmente y también supone un importante esfuerzo en investigación y desarrollo.

2.2 Posibles Soluciones

[3], [11]. Para transportar eficientemente los nuevos servicios descritos se debe optimizar el coste total de la red de transporte incluyendo la instalación, provisión y operación de la red. La red centrada en paquetes debe tener la capacidad de abordar mayores demanda de tráfico y velocidades de línea más altas, lo que supone aumentar la capacidad de los canales ópticos en el corazón de la red, bien evolucionando a 40Gb/s mediante tecnología SDH/SONET ó escalando el protocolo Ethernet hasta 100Gb/s.

Se ha demostrado ya que se pueden transportar velocidades binarias de 100Gb/s por longitud de onda sobre el medio y a largas distancias, pero en cualquier caso los principales costes de la red troncal no radican en la tecnología de transmisión WDM sino en los equipos de conmutación (circuitos o paquetes).

Aproximadamente del 50% al 80% del tráfico en un nodo es tráfico en tránsito resultando una arquitectura muy ineficiente cuando se aumentan los volúmenes de tráfico. Una opción prometedora para reducir los costes totales de la solución sería saltarse o sobrepasar a nivel óptico o Ethernet estos nodos de tránsito, lo que será de vital importancia cuando se esté transportando tráfico 100GbE. Es necesario examinar el servicio y sus requerimientos y determinar en qué puntos una cierta funcionalidad es requerida y en qué capa se implementa. El resultado será una red en la que la mayoría del tráfico es transportado en vez de enrutado, permitiendo optimizar el tráfico futuro.

Para conseguir esto es necesario nuevos protocolos, de los cuales muchos se encuentran en discusión y evaluación por los operadores. Se han investigado las ventajas e inconvenientes pero no existe de momento un consenso ni en la industria ni en los operadores. PBB (Provider Backbone Bridging) y PBB-TE (Provider Backbone Bridge-Traffic Engineering) son ejemplos de protocolos Ethernet mejorados que conectarían las diferentes sedes mediante encapsulación de direcciones MAC. Otro ejemplo de tecnologías de transporte es el T-MPLS (Transport Multi Protocol Label Switching). Este protocolo se basa en MPLS y ofrece una arquitectura equivalente a circuitos ó lambdas permaneciendo el concepto de gestión parecido al de la red SDH. Ambas tecnologías tendrán capacidad de trabajar con interfaces a 100GbE que se apoyarán en la red óptica WDM.

Pero la transmisión óptica a velocidades de línea de 100Gb/s presenta problemas físicos limitantes: Dispersión cromática (CD): La tolerancia de la dispersión cromática para canales a 10Gb/s es típicamente 1000ps/nm mientras que a 100Gb/s es de 10ps/nm que es menos que la variación de CD que sufriría un enlace de 500Km de longitud debido a la influencia de la temperatura en el curso de un año; Dispersión por modo de polarización (PMD): la velocidad de transmisión de la luz en la fibra no sólo depende de la longitud de onda utilizada sino también del estado de polarización de la señal óptica. Los diferentes estados de polarización de una misma señal pueden viajar a diferentes velocidades provocando una diferencia entre los dos estados de polarización. Esto es lo que

se conoce como DGD (Diferencial Group Delay) y no es constante sino que presenta un comportamiento estadístico. El DGD máximo tolerado es menor de 1 ps que es equivalente a lo que podría variar el DGD en una transmisión en menos de un milisegundo; Relación Señal Ruido Óptica (OSNR): La OSNR (Optical Signal Noise Ratio) se ve empeorada en 10dB en transmisión a 100Gb/s frente a los valores a 10Gb/s usando el mismo formato de modulación; Efectos no lineales. Mientras los efectos lineales como GVD (Group Velocity Delay) y PMD pueden ser compensados con módulos TDC ó PMDC, los efectos no lineales son difíciles de compensar limitando la potencia óptica y por tanto la transmisión. Estos efectos no lineales aunque también son limitantes no presentan tanta dependencia a la velocidad binaria como los efectos anteriores.

Con objeto de evitar todos los efectos degradantes que ocurren en la transmisión a 100Gb/s se están analizando soluciones basadas en multiplexación inversa, consistente en descomponer o demultiplexar la señal 100GbE en señales de menor velocidad que presentan menos inconvenientes para su transmisión en paralelo, evitando la degradación y aumentando los alcances. Los “routers” deberán poder encaminar el tráfico conjunto proveniente de lambdas adyacentes ya que en caso contrario aparecerán problemas de retardos. Pero este tipo de soluciones congestionan la red de transporte y la transparencia deberá comprobarse realmente. Encaminar este tráfico en diferentes señales sobre diferentes trayectos y usar “buffers” de memoria para compensar diferentes retardos no es una buena solución ya que a estas velocidades supondría un problema tanto técnico como económico. Además, este tipo de soluciones utilizando multiplexación inversa son más difíciles de manejar en la red que los interfaces nativos/serie a 100Gb/s. Esto es especialmente complicado en redes malladas donde se deben asegurar la disponibilidad de recursos, por ejemplo 10x10Gb/s, extremo a extremo. Otro buen argumento que favorece los interfaces 100Gb/s nativos es que aumenta el ancho de banda existente por enlace y ofrece suficiente capacidad para la agregación. Por ejemplo, interfaces 100Gb/s nativos permite alcanzar hasta 8Tb/s usando amplificadores de banda C y se quedaría en 0,8Tb/s utilizando 80 canales a 10Gb/s.

A pesar de las desventajas comentadas anteriormente, el uso de multiplexación inversa para redes simples podría ser interesante gracias a la madurez de la tecnología 10Gb/s y su atractivo precio.

Una solución más elegante es transportar las señales en su formato original minimizando el uso de la capacidad en la red, facilitando el encaminamiento de los servicios en los “routers”, así como su transporte en redes malladas. Las desventajas que presenta esta opción son básicamente los esfuerzos en una ingeniería más compleja que requiere de una óptica más sofisticada, pero es la opción que solventa realmente el problema capacidad y cuellos de botella en la red y facilita el encaminado de los servicios.

3 Dispersión Cromática y PMD

3.1 Dispersión Cromática

3.1.1 Fundamentos

La dispersión cromática es un fenómeno que ensancha los impulsos ópticos, causada por la interacción de la luz con el material utilizado para construir la fibra. Por cada kilómetro de fibra, los impulsos quedan afectados por una cantidad de dispersión cromática; de este modo, después de cierta distancia unos impulsos empiezan a solaparse con otros adyacentes, lo que provoca un incremento del nivel de los ceros. Esto da lugar a que sea más difícil recuperar los símbolos transmitidos en el receptor, ya que los ceros han aumentado su nivel y los unos lo han disminuido.

Siguiendo el desarrollo presente en [1] y en [2]:

Supongamos que una señal se traslada una distancia l con una constante de propagación β , el desarrollo de Taylor de la constante β en torno a la frecuencia ω_0 se puede escribir como:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

donde β_1 es la inversa de la velocidad de grupo, V_g , es decir:

$$\beta_1 = \frac{1}{V_g} \quad [\text{s/m}]$$

El retardo de grupo de la señal, τ , se puede calcular multiplicando β_1 por la distancia de transmisión:

$$\tau = \beta_1 l = \frac{l}{V_g}$$

β_2 es el coeficiente de dispersión de la velocidad de grupo, que viene expresado por:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

Donde D es el coeficiente de dispersión de la fibra, λ es la longitud de onda de la portadora y c es la velocidad de la luz en el vacío. La ecuación anterior se puede reordenar para obtener el coeficiente de dispersión cromática:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

Que determina el retardo de grupo de la señal por unidad de ancho de banda, $\delta\lambda$ y por unidad de distancia l , todo ello expresado en $ps/nm \cdot km$.

Después de la transmisión, la dispersión cromática acumulada se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$CD_{acumulada} = D \cdot l = \frac{\tau}{\delta\lambda} \quad [\text{ps/nm}]$$

De esta ecuación se puede deducir que la anchura espectral de la señal determina el límite de transmisión del sistema. Con la misma cantidad de $CD_{acumulada}$, la señal con mayor anchura espectral, $\delta\lambda$, experimenta un mayor retardo de grupo que una señal con menor ancho de banda.

En los sistemas WDM, cada portadora óptica viaja a diferente velocidad. Esto se debe a que las longitudes de onda dependen del coeficiente de refracción. Este fenómeno se caracteriza por el coeficiente de pendiente de la dispersión, S :

$$S = \frac{D}{\Delta\lambda} \quad [\text{ps/nm}^2 \cdot \text{km}]$$

Donde $\Delta\lambda$ es el rango de longitudes de onda WDM. La pendiente de dispersión total al final de la transmisión se obtiene multiplicando S por la longitud del enlace l . Este valor es distinto para cada diferente tipo de fibra óptica.

El ensanchamiento producido por la dispersión cromática tiene como resultado el solapamiento de impulsos vecinos. Además de la interferencia entre símbolos (ISI), el solapado de impulsos también provoca efectos no deseados como la modulación cruzada de fase intracanal (IXPM) y el mezclado de cuatro ondas intracanal (IFWM).

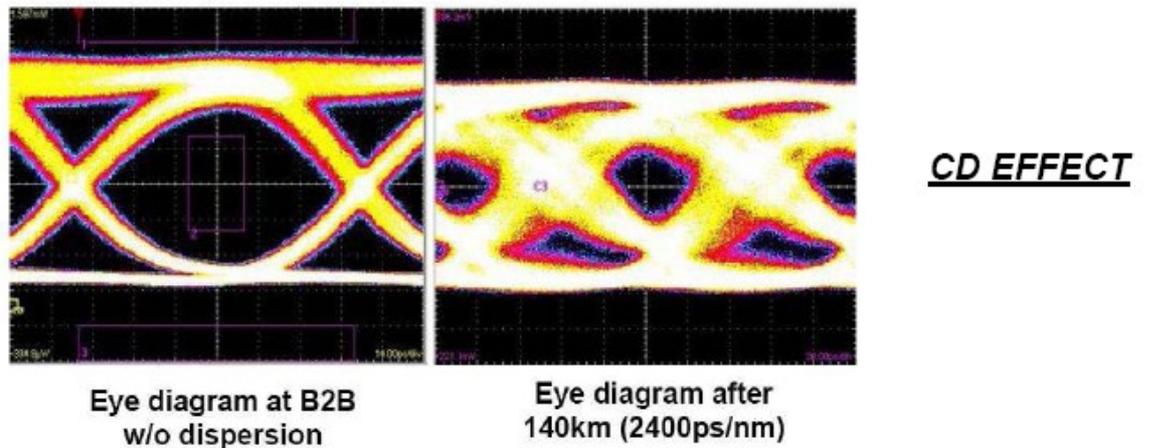


Figura 4 Efecto de la dispersión cromática

3.1.2 Soluciones

La solución a la dispersión cromática consiste en la compensación de la misma. En este estudio se utilizan y comparan dos modos de compensación de la dispersión:

- Compensación en línea: Mediante el uso de fibra compensadora (DCF).

- Compensación en recepción: Mediante el uso de módulos de compensación de la dispersión(DCM)

La primera opción presenta una solución más barata pero debido a que los tramos de fibra compensadora introducen atenuación, es necesario compensarla, introduciendo así más ruido en la señal.

3.2 Dispersión por el modo de Polarización (PMD)

[5]. La dispersión por el modo de polarización (PMD) es la manifestación de la birrefringencia (anisotropía) presente en la fibra. Debido a imperfecciones en la simetría circular de la fibra, existen diferencias de propagación en las diferentes orientaciones de la onda. Una onda de luz, dependiendo de su campo eléctrico, llamado polarización, tiene diferente velocidad de propagación. Esta dependencia de la polarización de la constante de propagación (paralización) provoca la dispersión de los impulsos. La explicación más aproximada de su efecto es la de duplicar el impulso en dos copias propagándose a diferente velocidad.

Las causas de la birrefringencia en una fibra monomodo se pueden clasificar de forma general en intrínsecas y extrínsecas.

Los factores intrínsecos son aquellos presentes en la fibra desde el mismo momento de su fabricación. Antes de que se desarrollaran métodos especializados, estos procesos de fabricación inducían cierta asimetría que causaba birrefringencia; estas fibras (anteriores a 1995, generalmente) presentan valores de PMD de $0,5 \text{ ps/km}^{1/2}$. En la actualidad las fibras se fabrican con mucho más precisión y los valores típicos de PMD están por debajo de $0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$. Los factores extrínsecos son aquellos que aparecen después de la fabricación de la fibra. Tensiones en la fibra, presiones externas (trenzados, doblajes) y la temperatura influyen en la simetría de la fibra y, por tanto, en el efecto sobre la transmisión en la polarización.

Los estados de polarización y el retardo dependen de la birrefringencia de la fibra. En una fibra la birrefringencia varía localmente y la birrefringencia local puede fluctuar con el tiempo por cualquiera o varios de las causas intrínsecas o extrínsecas. De este modo, el impulso de salida de una larga fibra será el resultado de una compleja superposición de todos estos efectos. Ya que las fibras nuevas tienen por lo general bajos coeficientes de PMD, para los sistemas de 10Gb/s no era necesaria su compensación; sin embargo, para sistemas de más de 40Gb/s y larga distancia, ésta se hace indispensable.

Se ha demostrado que para un ancho de banda óptico suficientemente pequeño el efecto global puede ser descrito como una separación del impulso de entrada en dos impulsos de salida con distintos estados de polarización (estados principales). Este efecto se denomina PMD de primer orden. Los estados principales y el retardo (retardo de grupo diferencial, DGD) variarán estadísticamente en el tiempo. El valor medio del DGD se toma como una medida del PMD. Todos los demás efectos complejos se denominan PMD de orden superior.

El efecto de la birrefringencia y del PMD se puede considerar de forma diferenciada para *vanos* de corta y de larga distancia.

En *vanos* cortos, las tensiones se pueden considerar actuando de forma uniforme en toda la longitud. Por lo tanto estos segmentos de vuelven bi-modales debido a la birrefringencia inducida por las tensiones. Las constantes de propagación de los dos modos de propagación son ligeramente diferentes. Por lo tanto, aparece un retardo diferencial en el *vano* lo que provoca el ensanchamiento del impulso de entrada. Matemáticamente, este ensanchamiento se puede describir como:

Sean β_s y β_f las constantes de propagación de los modos más lento y más rápido, respectivamente, y n_s y n_f sus correspondientes índices de refracción, entonces:

$$\beta_s - \beta_f = \frac{\omega n_s - \omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c}$$

donde ω es la frecuencia angular y c la velocidad de la luz en el vacío. La velocidad de grupo diferencial, expresada como el retardo de grupo por unidad de longitud se obtiene tomando la derivada de las constantes de propagación:

$$\frac{\Delta \tau}{L} = \frac{d}{d\omega} (\beta_s - \beta_f) = \frac{\Delta n}{c} - \frac{\omega}{c} \frac{d}{d\omega} \Delta n$$

El retardo de grupo por unidad de longitud, $\Delta\tau/L$, se denomina comúnmente como el coeficiente PMD de la fibra, siendo su unidad ps/km.

La relación entre el retardo inducido por el PMD y la longitud de la fibra no es lineal cuando estamos hablando de enlaces *long-haul*. La razón se encuentra en el fenómeno llamado acoplamiento de modo que tiene lugar en todas las fibras cuya longitud es superior a cierta longitud estadística denominada *longitud de correlación* o *longitud de acoplamiento*. Cuando la luz se propaga por una fibra existe un intercambio constante de energía entre los modos que se propagan. Este cambio aleatorio de energías se debe a la variación de las tensiones y perturbaciones que experimenta la fibra a lo largo de toda su longitud.

La longitud de correlación es una cantidad estadística definida como la longitud a la que la potencia media en el modo de polarización ortogonal está dentro de $1/e^2$ de la potencia del modo de entrada. La longitud de correlación puede variar entre unos cuantos metros y más de un kilómetro dependiendo del tipo de fibra.

El efecto del acoplamiento de modos es que el DGD tiene una dependencia con la longitud en raíz cuadrada más que una dependencia lineal. Sin embargo, en cualquier caso, el PMD provoca una dispersión de la señal óptica. Por lo tanto, mientras este ensanchamiento es predecible en el caso de enlaces cortos, en enlaces largos resulta probabilística.

La penalización en potencia provocada por el PMD se puede aproximar por:

$$\varepsilon \cong \frac{A \Delta \tau^2 \gamma (1 - \gamma)}{T^2}$$

donde ε es la penalización en potencia en dB, $\Delta\tau$ es el DGD, γ es la razón de separación de potencia entre los dos modos ($0 < \gamma < 1$), y T es el ancho de banda a la mitad del máximo del

impulso. El factor A es un parámetro adimensional determinado por la forma del impulso y las características del receptor. Otra relación que da una estimación de la limitación inducida por la tasa binaria y el vano es:

$$B^2 L \approx \frac{0,02}{PMD^2}$$

donde B es la tasa binaria en Gb/s y L es la longitud en km y el PMD expresado en ps/km^{1/2}. Esta relación se consigue considerando el caso de que el retardo inducido por el PMD debe ser menor del 14% del período de bit con el fin de evitar incurrir en una penalización de potencia por PMD de 1dB o mayor para un período de 30 minutos por año.

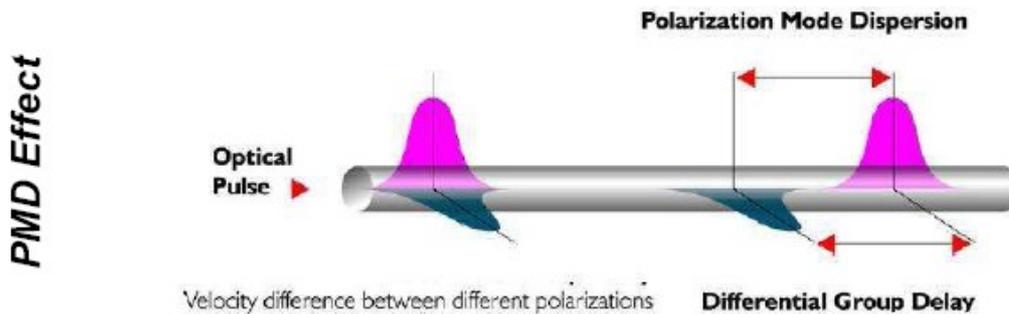
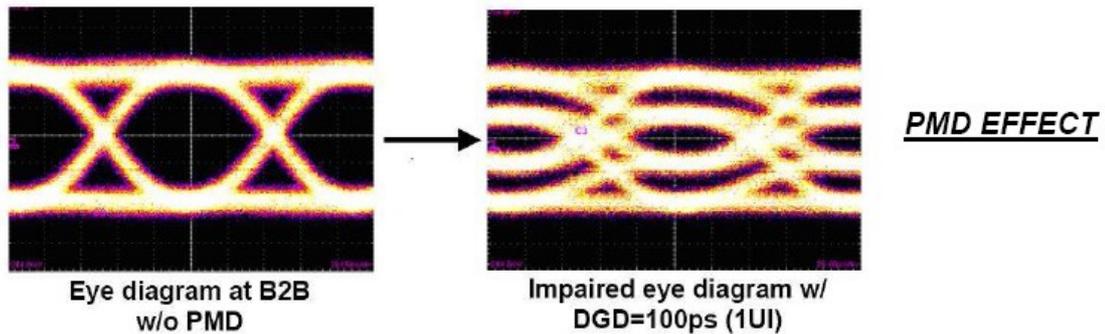


Figura 5 Efecto de la PMD

3.3 Comparación del efecto de la CD y la PMD sobre distintas tasas binarias

En esta tabla, se muestra la influencia de los diferentes tipos de dispersión sobre una transmisión óptica en función de la tasa de transmisión:

Parámetro	40Gbps frente a 10Gbps	100Gbps frente a 10Gbps	100Gbps frente a 40Gbps
Tolerancia a la CD	16 veces menor	100 veces menor	6,25 veces menor
Tolerancia al DGD	4 veces menor	10 veces menor	2,5 veces menor
Alcance limitado por PMD	16 veces menor	100 veces menor	6,25 veces menor

Tabla 1. Comparación del efecto de la CD, la DGD y la PMD sobre distintas tasas binarias

4 Formatos de modulación

[12], [3]. Hasta el momento en los enlaces de comunicaciones ópticas a 10Gbps se ha utilizado la modulación en intensidad NRZ, principalmente por su sencillez. El problema es, que a altas tasas binarias esta modulación empieza a presentar diversos problemas. Entre ellos se encuentra su amplio espectro (200Ghz de espaciado de canal) y su mal comportamiento frente a las distorsiones de transmisión.

Para la transmisión a altas velocidades se estudian formatos de modulación que van ampliando el número de bits por símbolo (y por tanto la complejidad de los transpondedores) con el fin de intentar adaptar una tasa binaria de 100Gb/s a las características de distorsión óptica de, por ejemplo, la actual planta de 10Gb/s.

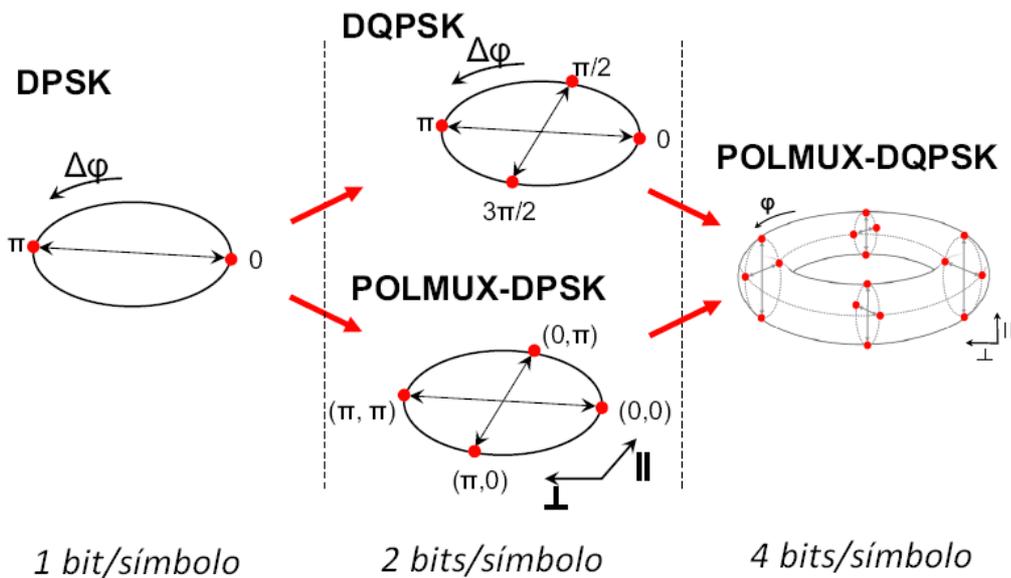


Figura 6 Evolución de los formatos de evolución para la reducción de la velocidad de símbolo

Aunque se están investigando nuevos formatos que satisfagan las necesidades tecn-económicas de los operadores, actualmente dos de ellos están cobrando importancia por el soporte de varios suministradores de equipos:

- **DQPSK:** es una modulación de fase diferencial con 2 bits por símbolo por lo que la velocidad final es de 50 Gbaudios.
- **DP-QPSK:** es una modulación de fase absoluta con 2 bits por símbolo en cada modo de polarización, por lo que al final se consiguen 4 bits por símbolo y una velocidad de 25 Gbaudios.

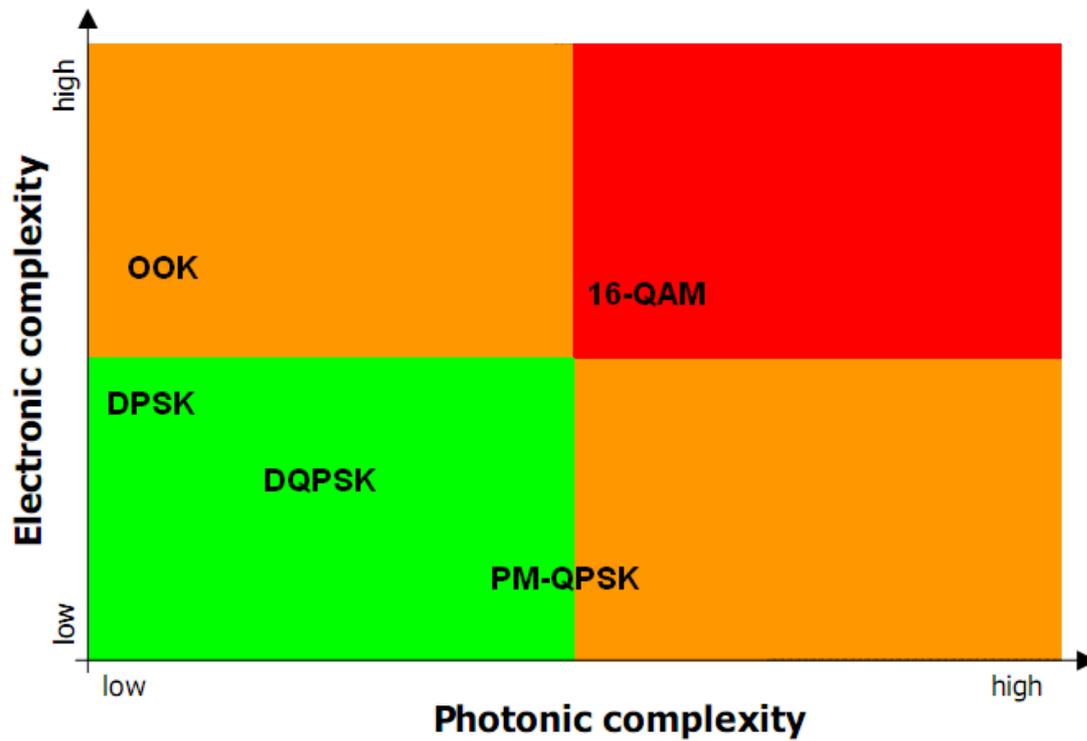


Figura 7 Posibles formatos de modulación según su complejidad electrónica-fotónica

En el presente estudio, se han centrado las simulaciones en dos modulaciones multinivel:

- DQPSK: 2 bits/símbolo.
- POLMUX-DQPSK: 4 bits/símbolo.

4.1 DQPSK

4.1.1 Fundamentos

[3],[12]. Esta modulación transmite cuatro símbolos diferenciados por un salto de fase de $\pi/2$: $\{0, \pi/2, \pi, -\pi/2\}$ a la mitad de la tasa binaria de agregación.

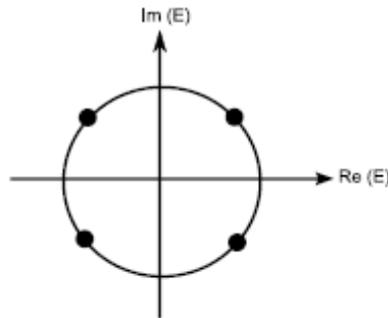


Figura 8 Diagrama de símbolos de la modulación DQPSK

La mejor implementación para la modulación de fase es la utilización de dos MZM. La configuración es la que se puede ver en la figura:

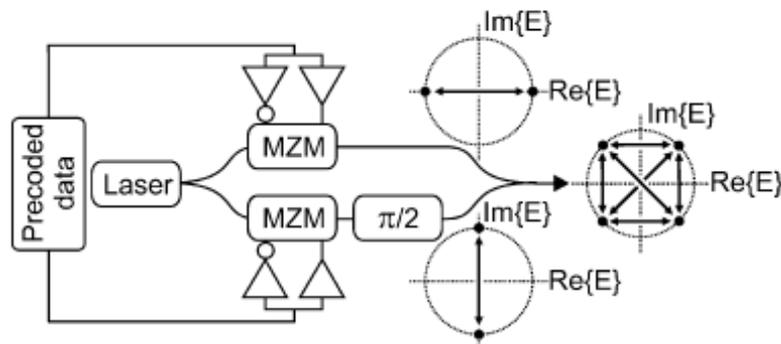


Figura 9 Elementos de un transmisor DQPSK

En primer lugar se dispone de un emisor láser de emisión continua seguido de un divisor de potencia para separar la luz en dos caminos de igual intensidad; dos MZM funcionando como moduladores de fase y un desplazador de fase de $\pi/2$ adicional detrás de uno de ellos. Finalmente un acoplador produce la señal de salida. Usando este tipo de estructura en el transmisor, primero se tiene la ventaja de los desplazamientos de fase exactos en π conseguidos por los MZM, independientemente de las perturbaciones de señal de polarización. En segundo lugar, este transmisor sólo necesita electrónica binaria lo que es mucho más fácil generar a altas velocidades que las señales de polarización multinivel. Opcionalmente se puede utilizar un conformador de impulso para producir una modulación RZ-DQPSK.

Se debe notar que la forma del espectro de DQPSK es idéntica a la de DPSK salvo que el espectro de DQPSK está comprimido en frecuencia en un factor 2 debido a que se

transmite a la mitad de velocidad de símbolo. La compresión del espectro es beneficiosa para cumplir con las necesidades de eficiencia espectral de los sistemas WDM al tiempo que mejora la tolerancia a la dispersión cromática. Asimismo, una duración de símbolo mayor que en los sistemas binarios hace a DQPSK más robusta frente al PMD.

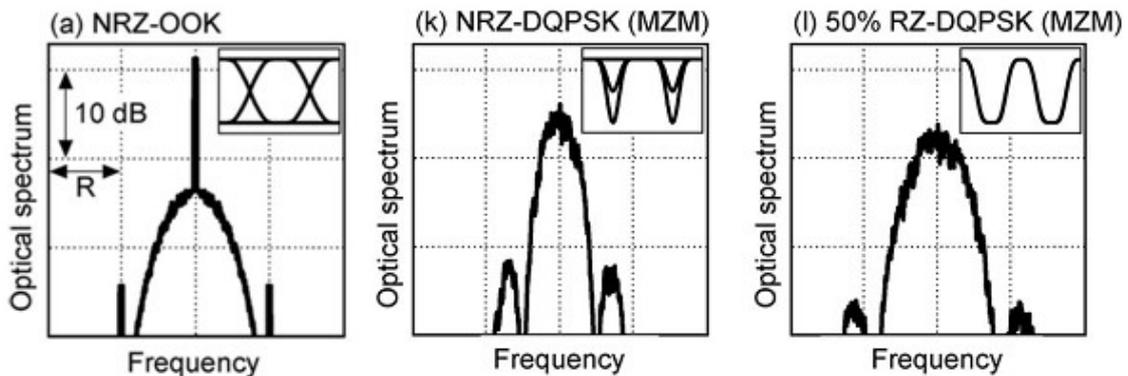


Figura 10 Comparación de espectros ópticos: NRZ, NRZ-DQPSK, 50% RZ-DQPSK

En el receptor la señal DQPSK se divide en dos partes iguales que van a parar a dos receptores balanceados DPSK polarizados diferencialmente de modo que se emplean en paralelo para remodular simultáneamente las dos tramas binarias contenidas en la señal DQPSK. Es necesario darse cuenta de que el retardo del DI tiene la misma duración de símbolo que DPSK, lo que resulta ser dos veces la duración de bit. El precio de esta estructura de receptor DQPSK es una tolerancia seis veces menor a las desviaciones de frecuencia entre el láser y el DI comparado con DPSK. Además, cualquier desplazamiento de frecuencia dependiente de la polarización de las características de transferencia del DI tiene que mantenerse siempre por debajo de la tolerancia a los *offset* de frecuencia de las respectivas modulaciones.

4.1.2 Implementación

En el simulador –VPI transmission maker cuyo funcionamiento se explica en el capítulo 5 de esta memoria- existe un módulo transmisor DQPSK así como un módulo receptor, el cual además estima el BER.

La implementación por tanto no presenta un problema en lo que a DQPSK se refiere.

4.2 POLMUX/DP-QPSK

4.2.1 Fundamentos

[7], [12]. Una de las opciones para afrontar los problemas de dispersión a altas velocidades binarias es reducir la velocidad de símbolo. La aproximación actual que más se está estudiando es la modulación *dual polarization quadrature phase shift keying*.

Esta modulación consiste en transmitir dos modulaciones QPSK, una en cada modo de polarización de la luz. De este modo es posible transmitir 4 bits en cada período de tiempo lo que posibilita una tasa de transmisión total de 100Gb/s con tan sólo una tasa binaria de 25Gb/s.

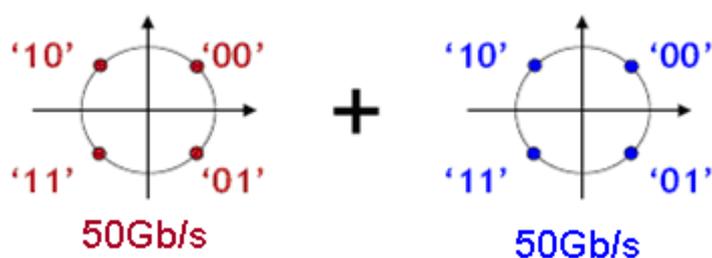


Figura 11 Diagrama de símbolos de la modulación DP-QPSK

Sin embargo, los beneficios que se logran al reducir la velocidad de transmisión se producen a costa de una mayor complejidad de los elementos transmisor y receptor. El transmisor está formado por dos moduladores QPSK cuya señal de salida se multiplexa en modo de polarización.

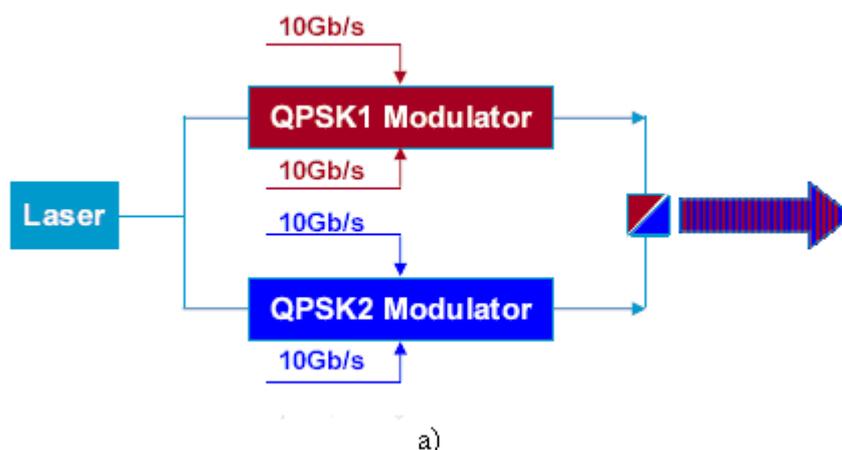


Figura 12 Elementos de un transmisor DP-QPSK

En recepción se realiza una detección coherente y un posterior procesamiento digital de la señal. La señal recibida primeramente atraviesa un separador de polarización que produce dos señales ortogonales. Cada una de estas señales se introduce un híbrido de 90° junto con la salida de un oscilador local (un láser sintonizable comercial), encargado de proveer una

referencia de polarización y seleccionar el canal WDM de recepción. La salida de cada uno de estos híbridos (4 señales provenientes de las señales en fase y en cuadratura de cada una de las modulaciones QPSK) va a parar a un fotodetector PIN donde son convertidas al campo eléctrico y filtradas antes de su procesamiento digital.

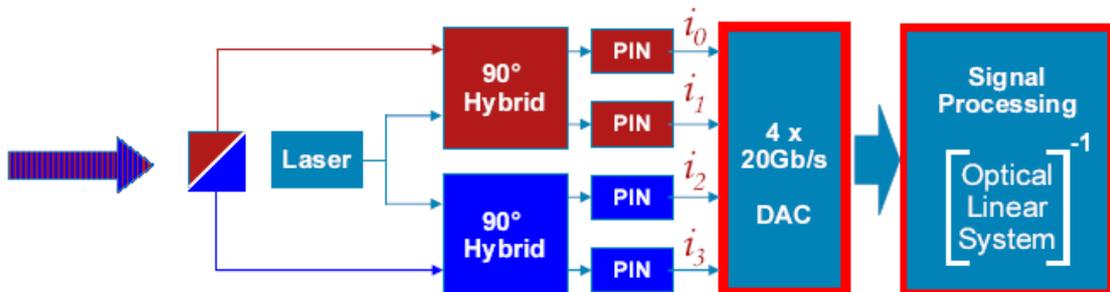


Figura 13 Estructura de un receptor DP-QPSK

4.2.2 Implementación

En este punto del estudio nos encontramos ante un grave problema. Todos los intentos de establecer un escenario POLMUX puro fueron inútiles.

El problema es que la fibra no conserva la polarización y conseguir alinear el receptor se convirtió en un problema que se expandía más allá de los límites de este estudio.

Dado este problema se decidió implementar POLMUX mediante una aproximación. La aproximación es la siguiente: Si consideramos que en recepción, la polarización está perfectamente alineada siguiendo el método arriba expuesto, podemos suponer que en lugar de un flujo POLMUX-100G, lo que tenemos una vez separados son dos flujos DQPSK-50G.

Con esta suposición, las simulaciones que se han efectuado consisten en un escenario DQPSK-50G.

5 ROADMs

5.1 Definición

[4], [8], [9] y [10]. Un ROADM (reconfigurable optical add-drop multiplexer) es un dispositivo que puede añadir, bloquear, hacer pasar o redireccionar luz visible de distintas longitudes de onda en una red de fibra óptica.

Antes del desarrollo de dispositivos de multiplexación óptica como son los ROADMs, el enrutamiento de las señales dentro de las redes ópticas debía realizarse convirtiendo la luz en señal eléctrica y utilizando switches electrónicos convencionales.

En un ROADM convencional, el enrutado se lleva a cabo sin ningún tipo de conversión optoelectrónica usando tres operaciones básicas llamadas ‘add’, ‘drop’ y ‘cut-through’. La operación ‘add’ genera un nuevo haz de luz, y la operación ‘drop’ lo retira de la señal. Cuando un haz pasa sin ningún tipo de modificación se hace uso de la operación ‘cut-through’. Estas operaciones permiten a las redes ópticas un enrutamiento de considerable complejidad. La configuración del sistema puede ser cambiada de forma remota.

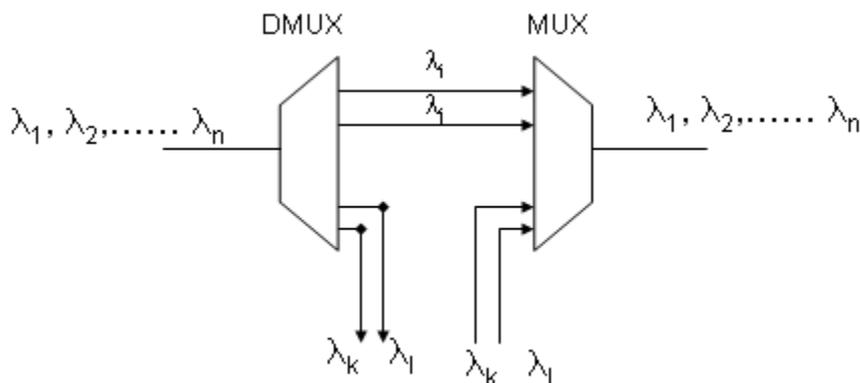


Figura 14 Esquema funcional de un ROADM

En la actualidad, existen dos tecnologías principales de ROADM en uso:

- Wavelength Blocking (WB)
- Planar light-wave circuit (PLC)

Ninguna de estas dos tecnologías permiten que haces de cualquier longitud de onda sean directamente enrutado a cualquier puerto sin la necesidad de efectuar múltiples

operaciones intermedias. Una tecnología emergente llamada ‘enhanced ROADM’ (eROADM) podría hacer en un futuro esto posible.

Un ROADM filtros ópticos para separar las longitudes de onda. La señal atraviesa un número determinado de ROADMs y la cascada de filtros resultante reduce el ancho de banda efectivo haciendo el sistema más propenso a errores.

En cuanto al filtrado que se realiza existen tres tecnologías distintas:

- Fibre Bragg Gratings (FBG)
- Arrayed Waveguide Gratings (AWG)
- Thin Film Filter (TFF)

Se ha demostrado que los filtros TFF son menos susceptibles al estrechamiento del ancho de banda entre canales. Sin embargo, en sistemas de alta capacidad los filtros AWG proporcionan bajas pérdidas. Los filtros FBG presentan mayor dispersión que los otros tipos.

De los filtros TFF se sabe que presentan una respuesta Butterworth y comúnmente se modelan como filtros Butterworth de orden 3. Los filtros AWG se modelan usando una respuesta sinc².

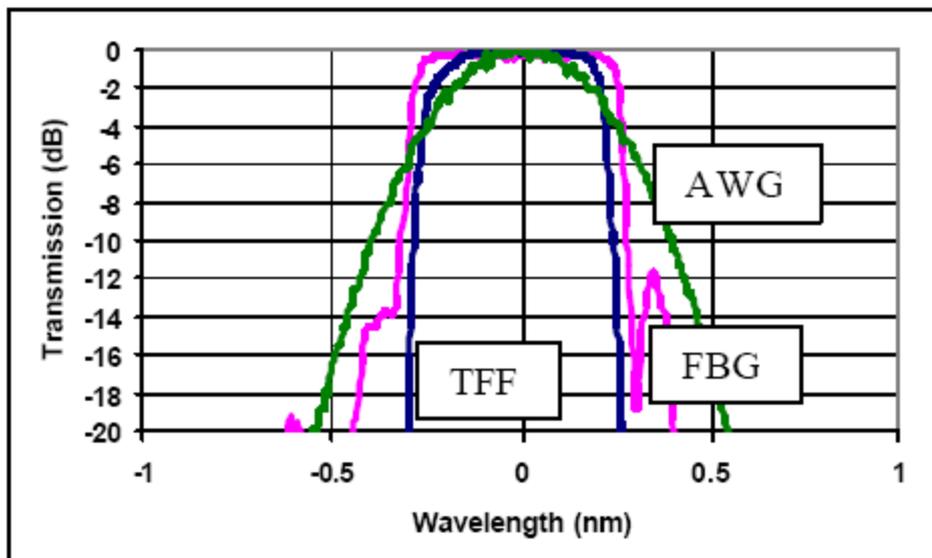


Figura 15 Comparación de la respuesta de los distintos tipos de filtro

Feature	FBG	Thin Film Filter	AWG
Filter steepness	✓✓	✓✓	✓*
Filter concatenation	✓✓	✓✓	✓
Filter dispersion	×	✓	✓
High channel count mux. loss	×	✓	✓✓

Figura 16 Comparación de las prestaciones de las distintas tecnologías de filtrado.

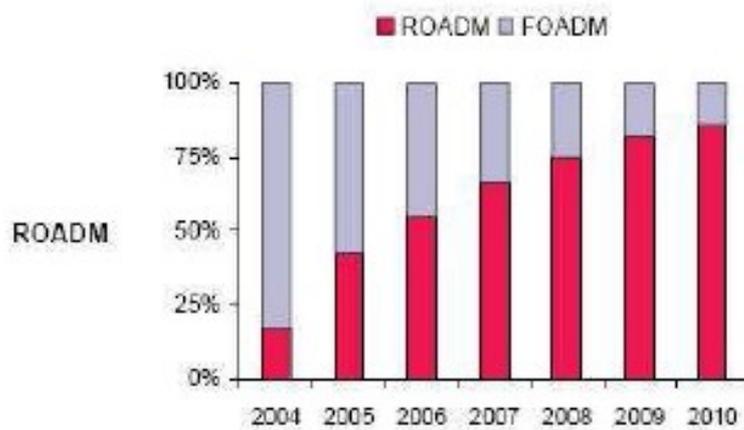


Figura 17 Estimación de la presencia de ROADM en los sistemas ópticos

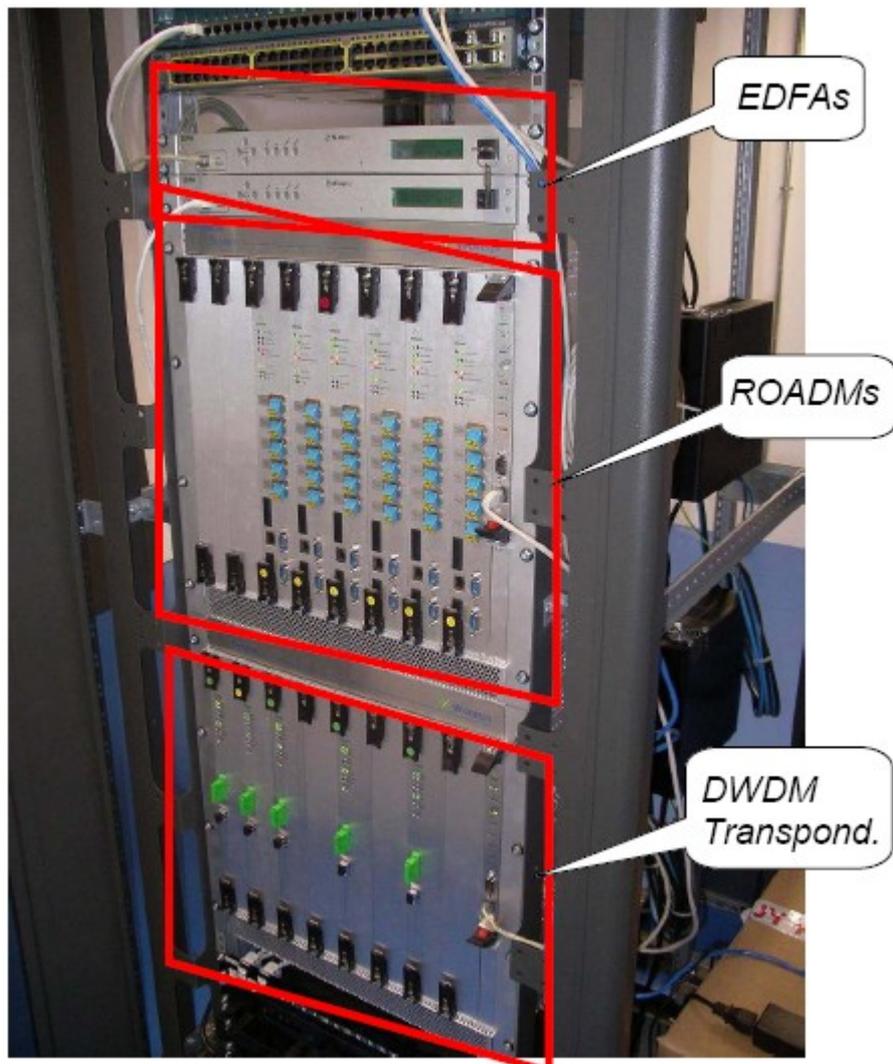


Figura 18 Equipo de red donde pueden observarse los amplificadores, los ROADMs y los transponders.

5.2 Implementación

A efectos de simulación un ROADM se ha considerado del siguiente modo:

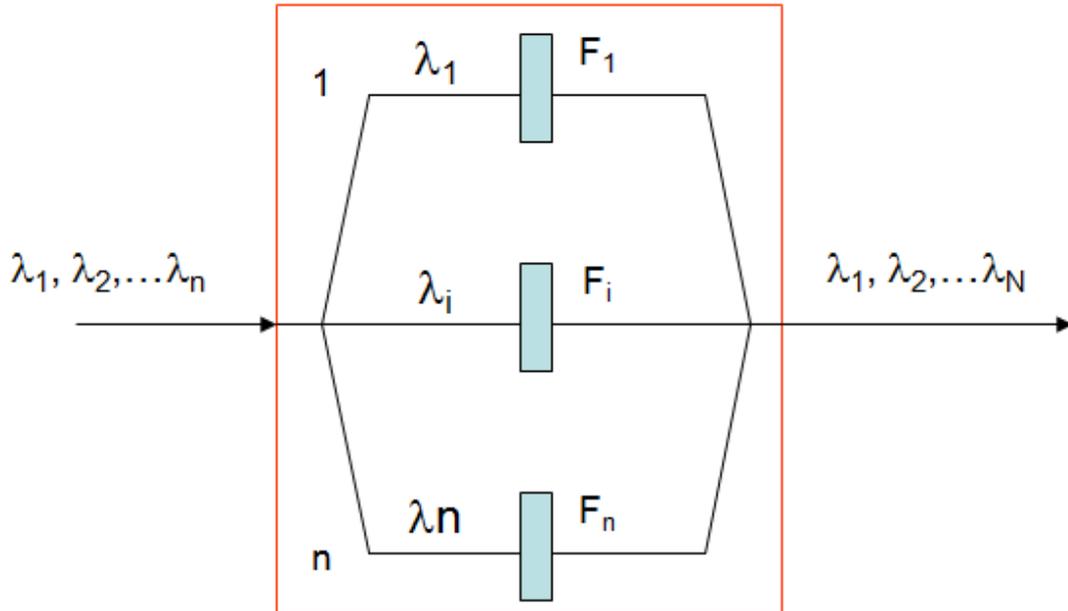


Figura 19 Esquema funcional de un ROADM

Cada una de las longitudes de onda se separa a la entrada del ROADM, más tarde sufre un determinado filtrado y finalmente se vuelven a agregar todas en una única señal WDM.

De este modo consideramos que un ROADM es un elemento de red que lo que hace es degradar la señal haciéndola sufrir una serie de filtrados. El ancho de banda de los filtros dependerá de la separación entre canales. En este estudio se ha considerado una separación entre canales dependiente de la tasa binaria, y es la siguiente:

- A 40 Gbps, 50GHz.
- A 100 Gbps, 100GHz.

Para modelar el esquema anteriormente mostrado se ha reestructurado el ROADM como dos WSS (Wavelength Selective Switching). Los ROADM están compuestos por dos módulos WSS en cascada: uno para la extracción de tributarios y otro para la inserción. El esquema considerado ha sido el siguiente:

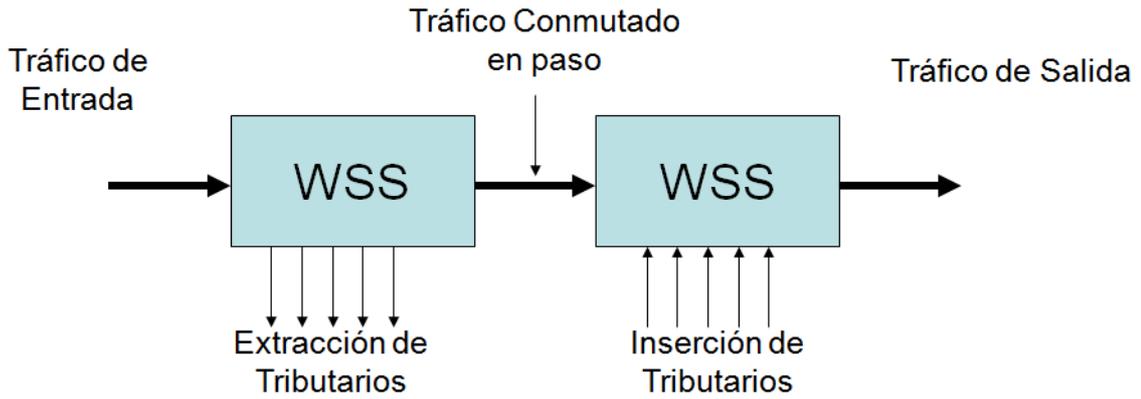


Figura 20 ROADM como 2 WSS en cascada

Las pérdidas de inserción se han establecido según datos de Telefónica I+D como 5dB. Cada WSS estaría compuesto por dos AWGs (Arrayed Waveguide Gratings) por lo que el esquema resultante sería:

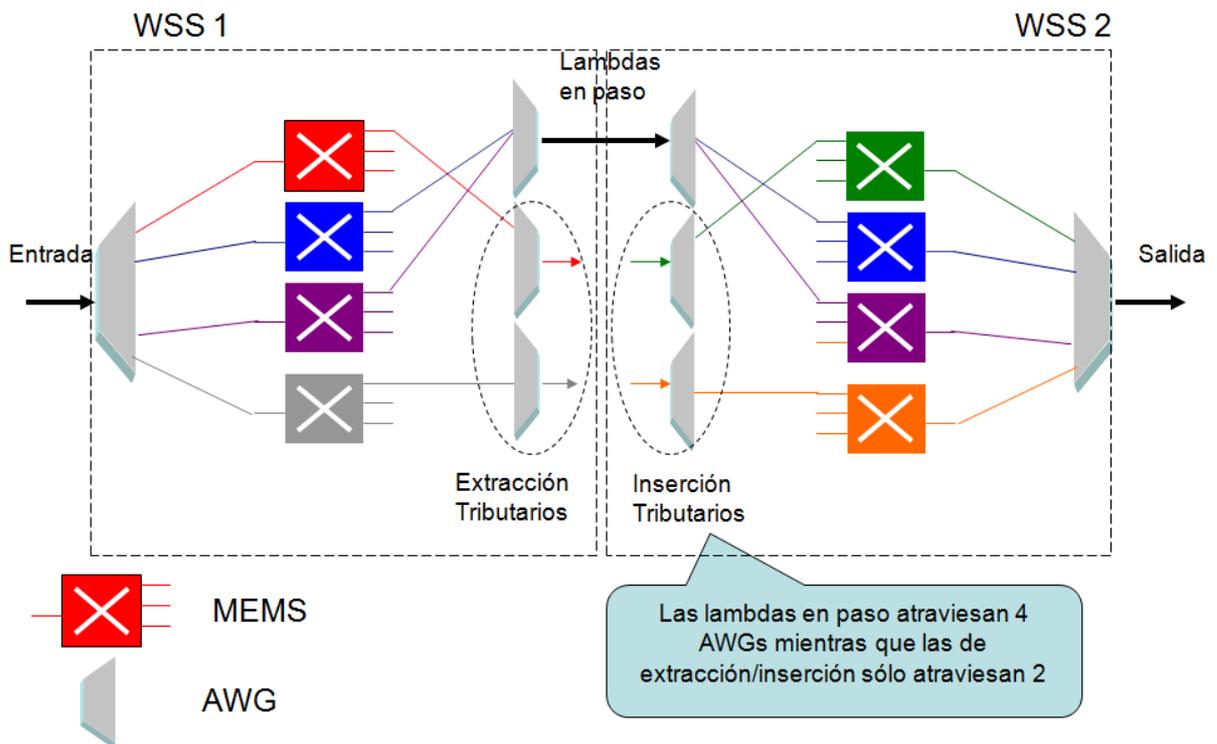


Figura 21 ROADM como 4 AWG

En este estudio se ha considerado el peor caso posible, por lo que se ha establecido que todas las longitudes de onda sean de paso.

El modelo que finalmente se ha implementado ha sido el siguiente:

- Pre-amplificación.
- Desagregación y filtrado de longitudes de onda.
- Agregación y filtrado de longitudes de onda.
- Post-amplificación.

El esquema final, el implementado en VPI es el siguiente:

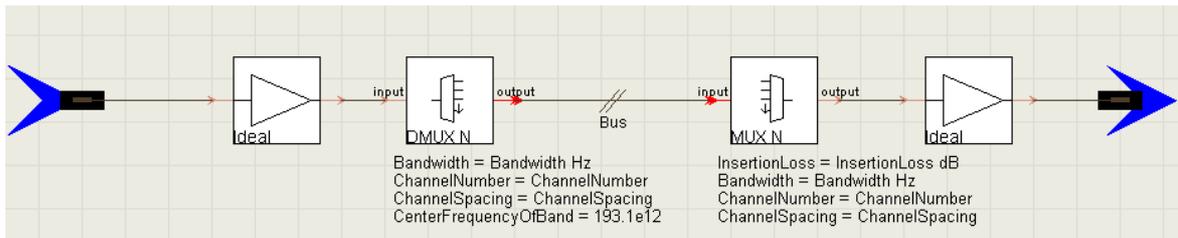


Figura 22 Implementación del modelo del ROADM en VPI

6 VPI transmission maker

El programa utilizado para acometer las simulaciones ha sido VPI transmission maker de la empresa VPI systems. El simulador empelado para realizar el estudio es VPItransmissionMaker™ WDM de VPI photonics

Su elección se ha realizado teniendo en cuenta su amplia aceptación en la industria y su versatilidad para acometer los estudios planteados.

Este programa es un potente simulador de comunicaciones ópticas que se basa en la creación de módulos.

Cada módulo puede representar un dispositivo, un componente, ... El usuario puede además crear sus propios módulos.

Los módulos presentes en Vpi van desde tramos de fibra, hasta complejos transmisores y receptores. Cada módulo se compone a su vez de otros módulos.

Los módulos básicos se denominan estrellas, los módulos compuestos a partir de otros módulos galaxias. Y las simulaciones, compuestas de módulos, galaxias, o ambos se denominan universos.

Este programa consta además de multitud de universos ejemplo ya implementados que simulan todo tipo de enlaces de comunicaciones ópticas.

Una de las limitaciones de este programa es el gran tiempo de cómputo que requieren algunas simulaciones. Dependiendo de la complejidad, una simulación puede llegar a tardar varias horas. Por esta razón, se hizo importante ajustar el diseño para que la simulación no se viera interrumpida por algún error inesperado.

6.1 Estructura

La estructura genérica de la creación de simulaciones en el programa es la siguiente:

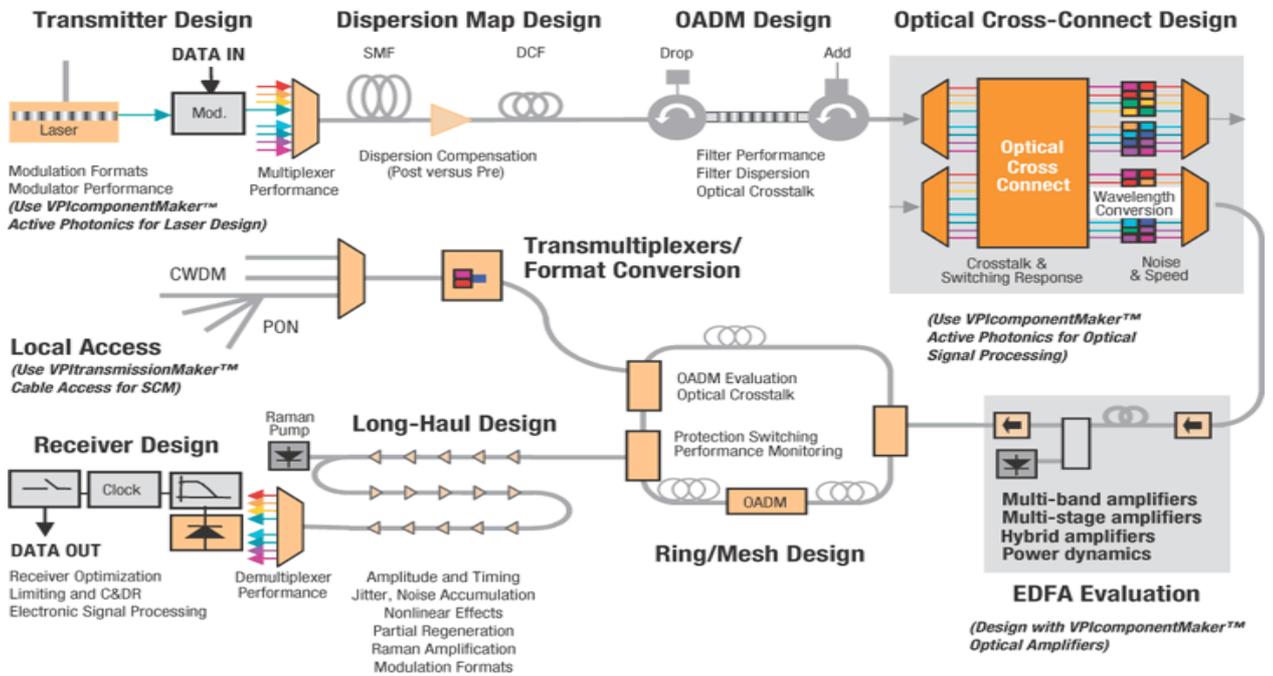


Figura 23 Esquema general del entorno de simulación

A continuación se muestra una captura de pantalla del simulador:

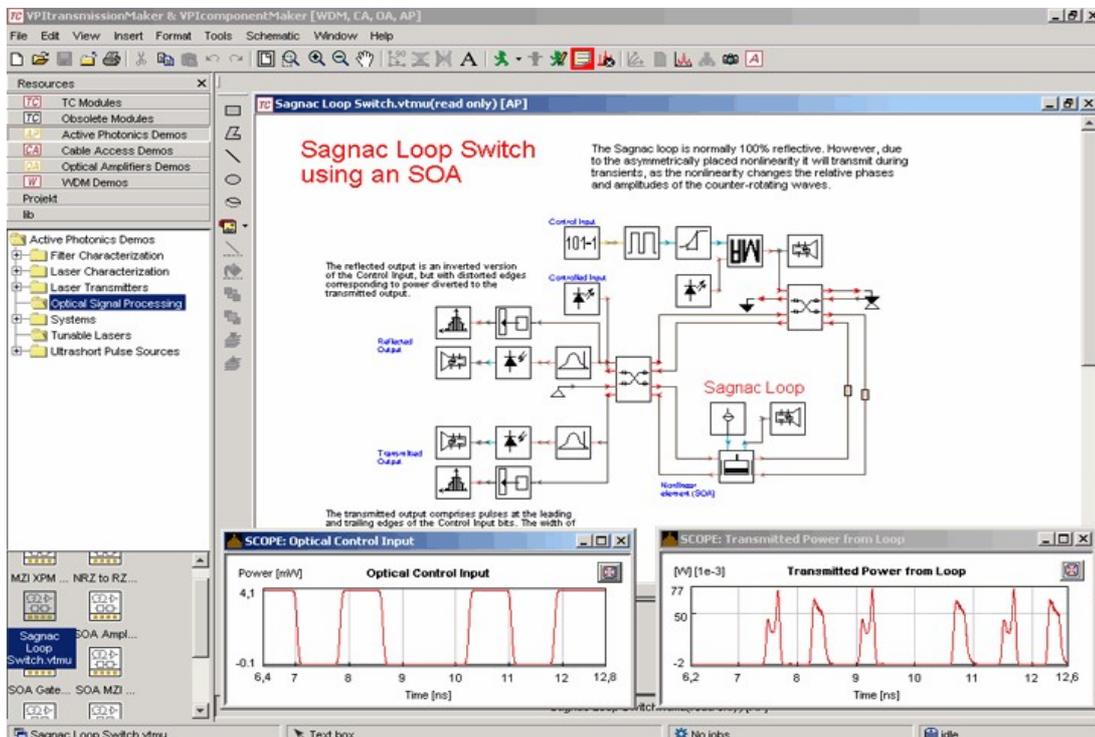


Figura 24. Captura de pantalla del simulador

En la parte izquierda se encuentra la barra de acceso a módulos, galaxias y universos presentes en Vpi. La carpeta TC modules contiene los módulos y galaxias elaborados por Vpi, mientras que el resto de carpetas contienen ejemplos de diversas categorías.

En la parte central es donde se crean los escenarios. Se unen los módulos, y se ejecutan pulsando el botón verde de la barra superior.

6.2 Funcionalidades

Lo que se pretendía en este proyecto era crear escenarios punto a punto, con varios canales, y medir la BER obtenida.

Además se pretendía estudiar un mismo escenario, variando ciertos valores como PMD, distancia recorrida,... Para ello, se encontraron funcionalidades útiles en VPI tales como 'sweep'-herramienta que permite hacer un barrido variando el valor de una determinada magnitud-, o Vpi photonics analyzer que a partir de una determinada simulación representa los valores de salida.

Las ejecuciones en Vpi están sujetas a una serie de parámetros generales que definen el muestreo que se realiza. Estos parámetros son:

- Time Window: Establece el periodo de tiempo real que se considera como un bloque de datos. Especifica la resolución de representaciones espectrales así como la precisión en la estimación del BER.
- SampleModeBandwidth: Especifica la tasa de muestreo de todas las señales.
- SampleModeCenterFrequency: Especifica una frecuencia central para todas las señales.
- SampleRateDefault: Tasa de muestreo por defecto. Se usa por defecto en todos los módulos, pero puede cambiarse para cada uno.
- BitRateDefault: Tasa binaria de transmisión.

La correcta elección de estos parámetros influye en la velocidad y las salidas de la simulación e incluso en si se producen fallos o no.

Los valores escogidos en este estudio han sido resultado de un compromiso entre el tiempo de ejecución de las simulaciones y la precisión de la salida. Trás varias pruebas se han considerado adecuados los siguientes valores:

- Time Window: 64/bitratedefault.
- SampleModeBandwidth: 64* bitratedefault.
- SampleModeCenterFrequency: 193.1e12.
- SampleRateDefault: 64*BitRateDefault
- BitRateDefault: 40e9.

6.3 VPI photonics analyzer

VPI photonics analyzer es la herramienta de visualización presente en VPI. La señal puede ser mostrada y analizada en 6 modos: OSA, Scope, EYE, RFSA, Poincare y Numerical. Son los cinco primeros modos los que trabajan con señales de salida de VPI. Para entradas ópticas se utilizan OSA, Scope, Eye y Poincare.

En este proyecto se ha hecho uso principalmente del modo OSA(Optical Spectrum Analyzer). El modo Eye, el cual representa el diagrama de ojos en recepción es útil para la medida del BER pero en este proyecto se hace uso de un receptor de DQPSK que es en sí mismo estimador del BER.

A continuación se muestra una captura de pantalla donde puede observarse el formato de salida de los resultados:

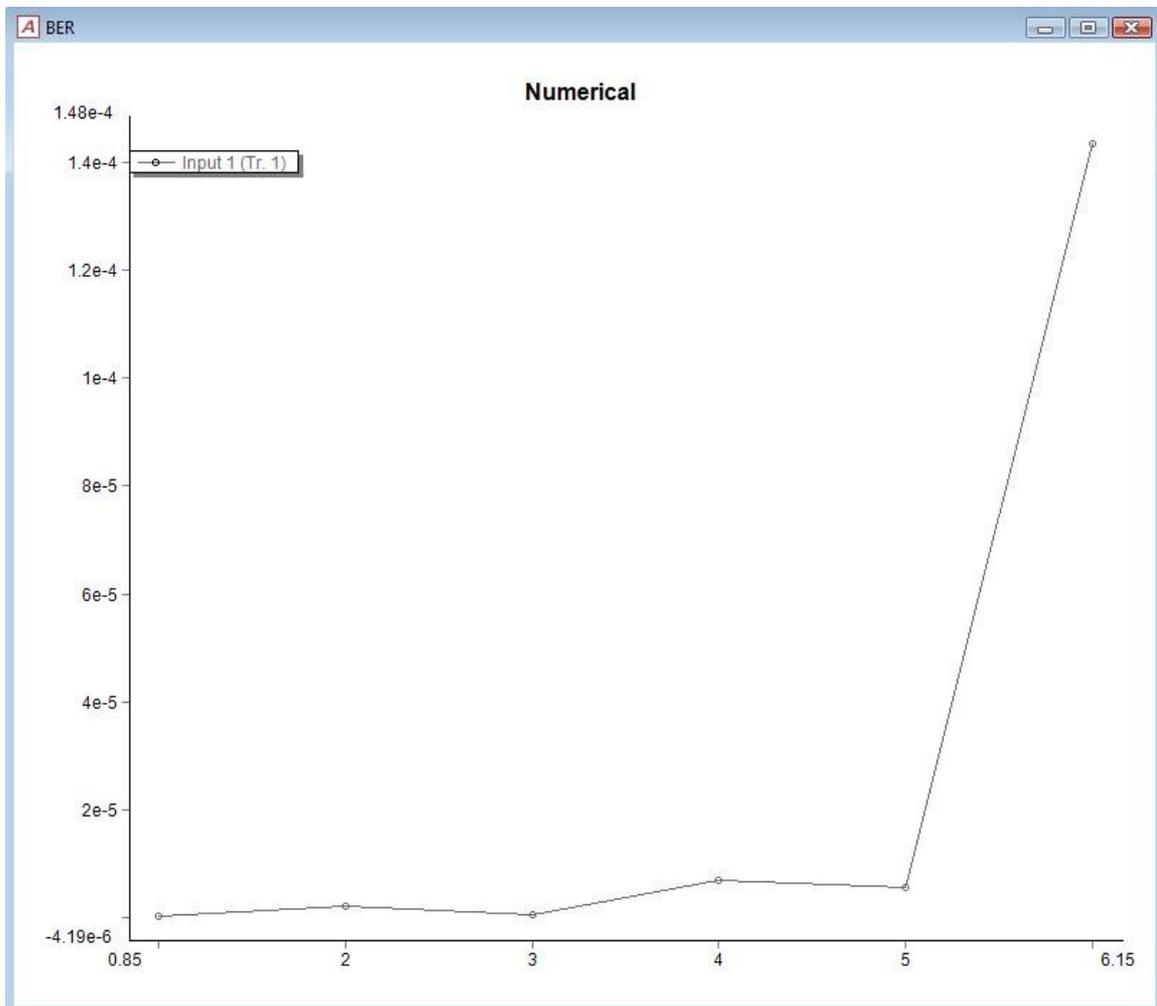


Figura 25 Captura de pantalla de VPI photonics analyzer

En esta gráfica lo que se representa es BER frente a número de vanos atravesados. Para determinar el alcance lo que se haría es añadir un marcador horizontal con valor BER=1e-4 y establecer el valor de número de vanos entero más próximo hacia la izquierda.

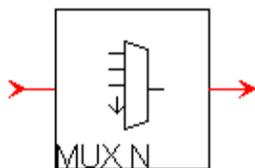
En este ejemplo concreto el alcance sería de 5 vanos.

6.4 Módulos principales utilizados

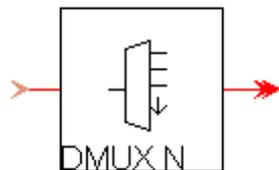
En este proyecto se ha hecho uso de distintos módulos presentes en VPI. A continuación se ofrece una breve descripción de los mismos:



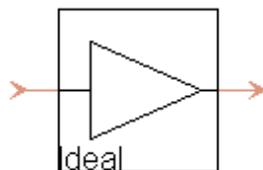
- Tx_DQPSK: Transmisor laser que modula la señal en formato DQPSK. Entre sus parámetros más importantes se encuentran potencia de emisión, frecuencia de emisión, tasa binaria,...



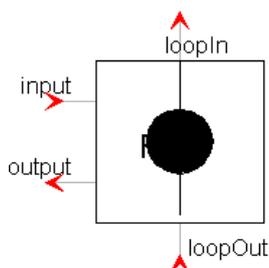
- WDM_MUX_N_1: Multiplexor. Multiplexa N canales en un único canal WDM. El tipo de filtrado que se ha tenido en cuenta es el Gaussiano. Parámetros mas importantes: tipo de filtro, perdidas de inserción,...



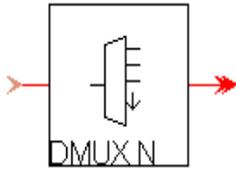
- WDM_DEMUX_1_N: Demultiplexor. Demultiplexa N canales a partir de un único canal WDM.



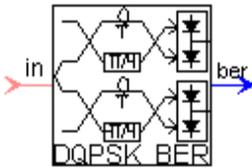
- AmpSysOpt: Amplificador óptico. Parámetros mas importantes: ganancia, figura de ruido,...



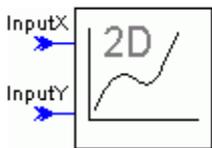
- RingInitialize: Este módulo permite construir bucles. Los cuales nos serán útiles para hacer pasar la señal por varias secciones amplificadas



- BusSelector: Permite seleccionar un canal WDM de entre todos los que se reciben para su posterior análisis.



- Rx DQPSK_BER: Receptor de DQPSK que además proporciona una salida con el BER resultante.



- NumericalAnalyzer2D: Módulo que llama a VPI photonics Analyzer entregándole el resultado obtenido para su representación.



- UniversalFiberFwd: Vano de fibra. Entre los parámetros utilizados principalmente se encuentran longitud del vano, atenuación, dispersión cromática, PMD, ...

7 Integración, pruebas y resultados

7.1 Consideraciones previas

La estructura básica de las simulaciones consiste en un enlace punto a punto a través del cual la señal atraviesa un cierto número de secciones amplificadas (con o sin ROADM). Inicialmente se multiplexan los N canales en transmisión, y se amplifican por medio de un booster. Cada sección amplificadora consiste en un tramo de fibra de 80 km, un tramo de fibra compensadora, y dos amplificadores establecidos para compensar las pérdidas que se producen.

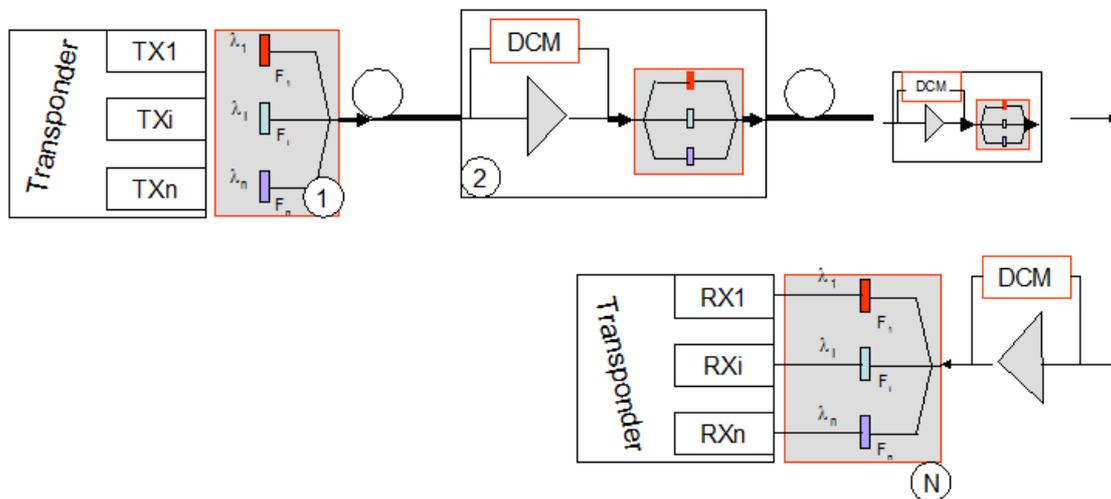


Figura 26 Estructura básica de las simulaciones con ROADM

El esquema se compone de nodos de origen, intermedios y destino. Los nodos intermedios pueden contener o no un ROADM. Mientras que los nodos origen y destino siempre lo contienen ya que allí se produce la inserción y extracción de los tributarios respectivamente.

Uno de los objetos de este estudio es estudiar si la posición de los ROADMs influye en el BER o si por el contrario solo influye el número de ROADMs que haya. Para ello se han establecido escenarios de longitud fija con un número determinado de ROADMs donde se pueda alterar el orden de los mismo con objeto de esclarecer el problema. En el caso de que el BER fuera completamente independiente de la posición de los ROADMs se podría crear una gráfica en la que se representara Alcance Vs Número de ROADMs.

El esquema de los nodos es el siguiente:

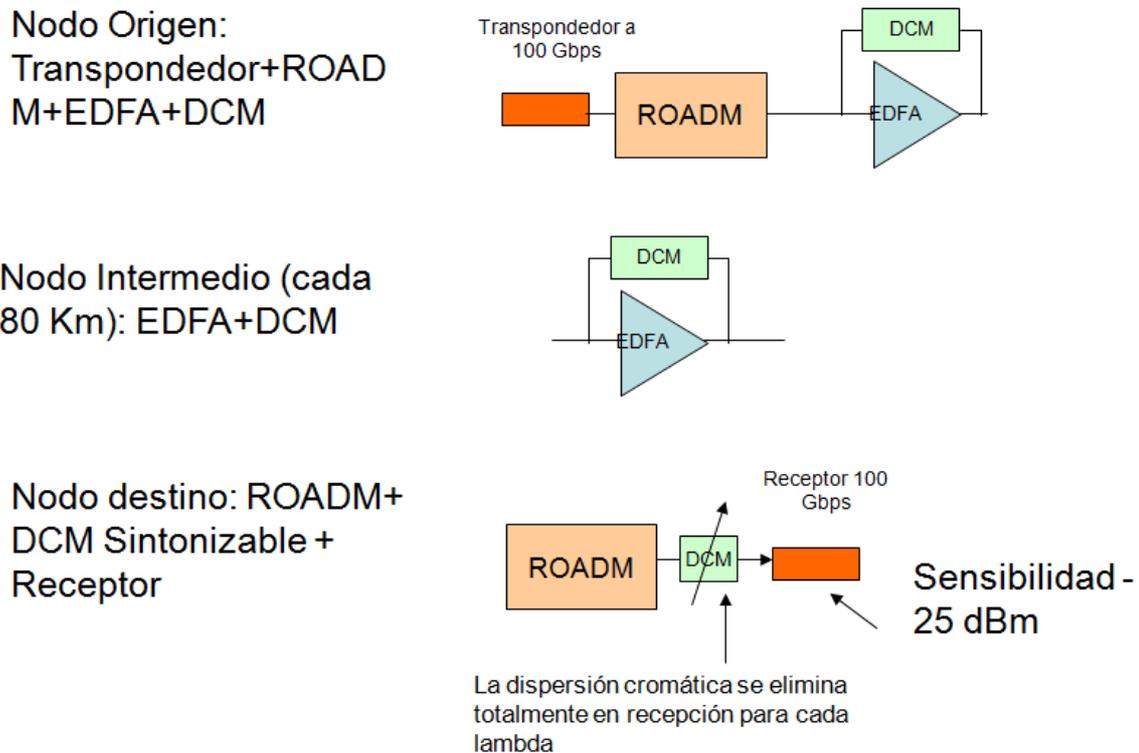


Figura 27 Nodos de Red

En cada enlace lo que se mide es el alcance obtenido. Para ello, se definen los parámetros principales, y después se va aumentando progresivamente el número de secciones amplificadas que atraviesa la señal dentro del enlace. El BER a partir del cual se considera que la señal no ha llegado correctamente es $1e-4$.

Para determinar el alcance, se mide con cuantos vanos deja de recibirse correctamente la señal, y el alcance se define como este número de vanos menos uno.

Primeramente se estudió un esquema con un número de canales fijo, en el cual se variará la potencia de emisión por canal. Esta potencia debía cumplir la condición de no superar 17dBm a la salida del booster debido a que a partir de esta potencia podrían surgir problemas de intermodulación.

Finalmente, en lugar de realizar un esquema con un número de canales fijo, variando la potencia de transmisión, se ha optado por 4 escenarios diferenciados con 8, 16, 32 y 64 canales en los cuales se varía la potencia de transmisión por canal según la expresión:

P_{canal} (salida del diodo láser) = $4 - 10\log(N) + 5$. de modo que la potencia a la salida del booster sea de 17dBm.

De esta expresión se deduce la siguiente tabla:

Canales	Pcanal
8	1.13mW
16	0.529mW
32	0.3mW
64	0.15mW

Tabla 2. Relación de potencias por canal para los distintos esquemas

Hay que tener en cuenta que las potencias arriba expuestas corresponden a la potencia por canal a la salida del láser (no del transmisor). VPI contempla el transmisor de DQPSK como dos láseres cuyas señales luminosas (continua) se acoplan al modulador. En este proceso se pierden 5 dB, de ahí el +5dB de la fórmula. Por lo que las potencias por canal reales a la salida del transmisor DQPSK son las arriba expuestas multiplicadas por un factor $10^{-0.5}$.

En realidad las pruebas se han realizado para 7, 15, 31 y 63 canales. Esto es debido a que en Vpi el número de canales debe ser par para que los mismos se alineen adecuadamente en el espectro.

Para la realización de las pruebas ha sido preciso determinar el ancho de banda óptimo de filtrado, para ello se ha realizado una prueba previa cuyos resultados son los siguientes:

- Determinación ancho de banda óptimo de los filtros.
- 40Gbps
- 5 canales, separación entre canales: 50Ghz.
- LaserAveragePower: =0 dBm.

Variación del ancho de banda de los filtros ('bandwidth'):

'bandwidth'	BER (1 vano)
0.75*bitratedefault	$>10^{-4}$
bitratedefault	4.067e-8
1.25*bitratedefault	3.8e-9
1.5*bitratedefault	2.78e-5
2*bitratedefault	0.017

Tabla 3 Ancho de banda óptimo de filtrado para 40G

- Determinación ancho de banda óptimo de los filtros.
- 100Gbps
- 5 canales, separación entre canales:100Ghz.
- LaserAveragePower: =0 dBm.

Variación del ancho de banda de los filtros ('bandwidth'):

'bandwidth'	BER (1 vano)
0.75*bitratedefault (75Ghz)	4.66e-5
Bitratedefault (100Ghz)	2.95e-7
1.25*bitratedefault (125Ghz)	4.061e-5
1.5*bitratedefault (150Ghz)	0.0016

Tabla 4. Ancho de banda óptimo de filtrado para 100G

El óptimo se sitúa en torno a 100Ghz.

Conclusiones:

De los resultados obtenidos se entiende que el ancho de banda óptimo es igual a la separación entre canales, de este modo 50Ghz para 40G y 100Ghz para 100G.

Las pruebas se han realizado para los dos formatos de modulación a estudiar: DQPSK y POLMUX. En ellas se ha buscado el alcance en unas determinadas condiciones. Se ha estudiado principalmente la influencia de la PMD, variando su valor entre 0.1, 0.5 y 1 ps/sqrt(km). Se ha estudiado la transmisión a las tasas binarias de 40Gbps y 100Gbps y se han estudiado distintos métodos de compensación de la dispersión cromática.

En ciertas pruebas lo que se ha medido es la BER en lugar del alcance, en este tipo de pruebas lo que se establece es un escenario de longitud fija, y se varían ciertas condiciones para ver como afectan al BER.

7.1.1 Parámetros de Simulación

■ Transmisión:

- Formatos de modulación: DQPSK, DP-QPSK.
- Potencia de emisión: $P_{tx} = -11$ dBm (con *booster* a la salida).
- Tasa de transmisión: 100Gb/s

■ Enlace:

- Vano entre secciones de amplificación-compensación: 80km.
- Compensación de la dispersión: *dispersion compensation fiber (DCF)*.
- Amplificación: EDFA (características variables según fabricante).
- **Fibra SMF** con las siguientes características:
 - $\alpha = 0,35$ dB/km
 - $D_{CD} = 20$ ps/nm·km
 - $D_{PMD} = 0,2-0,5$ ps/(km)^{1/2}
- Se simulan un total de **8, 16, 32 y 64 canales** situados a ambos lados de la longitud de onda central de la banda C:
 - N° canales (50GHz) = $193.10THz \pm k \cdot 50GHz$ $k=1..64$

$$N^{\circ} \text{ canales (100GHz)} = 193.10\text{THz} \pm k \cdot 100\text{GHz} \quad k=1..64$$

■ **Nodo:**

- ROADM formado por dos módulos WSS, imponiendo penalización por cascabilidad de filtros. En cada nodo, el tráfico de tránsito atraviesa 4 filtros AWG.
- La banda de paso de los filtros se estudiará tanto para 50GHz como para 100GHz

■ **Recepción:**

- En recepción se aplica el siguiente umbral de operación:

$$BER|_{\text{FEC}=6\text{dB}} = 10^{-12} \Rightarrow BER_{opt} = 4 \cdot 10^{-5}$$

- En un principio se supone el empleo de la técnica estandarizada por la G.709 (Reed-Solomon(255, 239)).

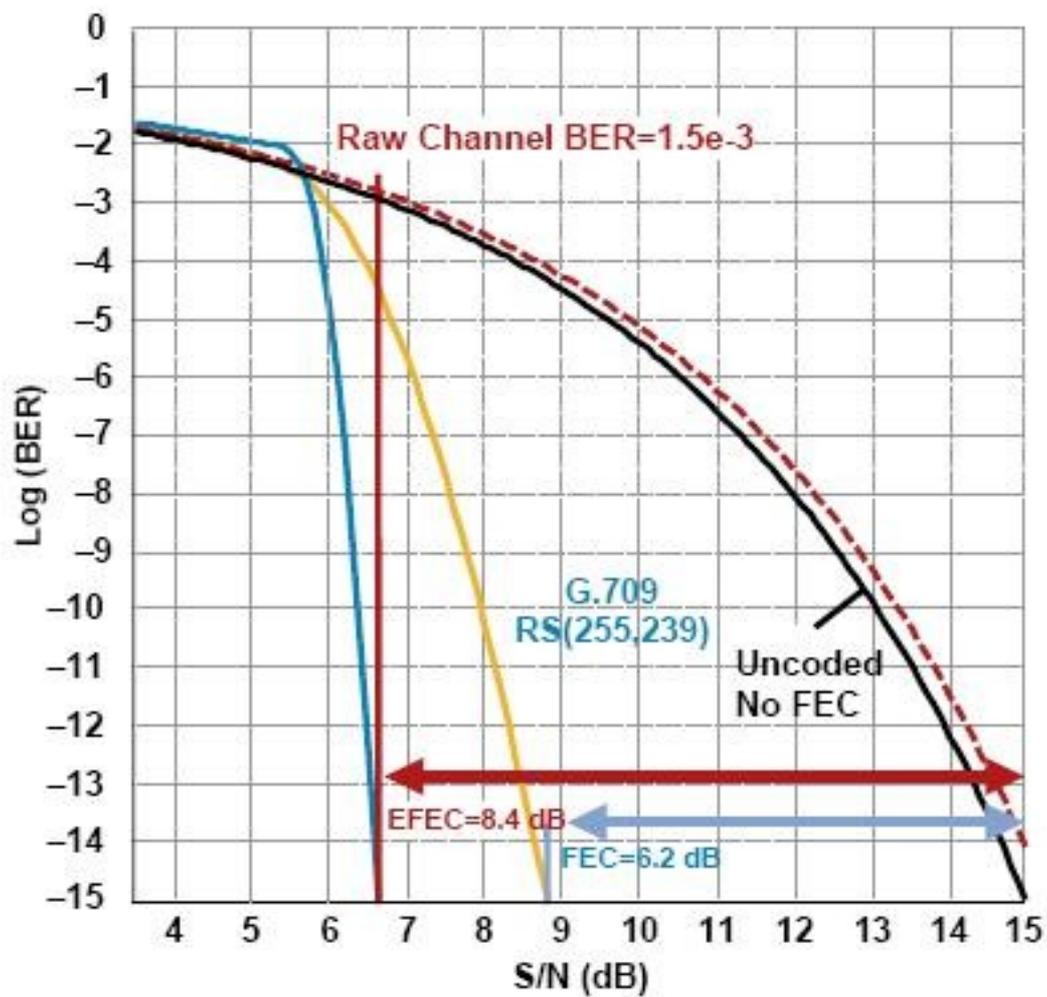


Figura 28 Ber y FEC

7.2 DQPSK

7.2.1 Pruebas

En cuanto a la simulación **DQPSK** se han desarrollado las siguientes tareas:

- Obtención del alcance máximo para el formato de modulación **DQPSK** en un enlace sin ROADM intermedios (pero sí en emisión y recepción) para una velocidad de transmisión de **40Gbps** y número de canales 8, 16, 32 y 64 (El alcance máximo, en todos los casos, se mide como el número de secciones de regeneración, siendo la longitud cada una de ellas de 80km).
- Obtención del alcance máximo para el formato de modulación **DQPSK** en un enlace sin ROADM intermedios (pero sí en emisión y recepción) para una velocidad de transmisión de **100Gbps** y número de canales 8, 16, 32 y 64 (El alcance máximo, en todos los casos, se mide como el número de secciones de regeneración, siendo la longitud cada una de ellas de 80km).
- Obtención del alcance máximo para el formato de modulación **DQPSK** en un enlace con ROADM intermedios para una velocidad de transmisión de **40Gbps** y número de canales 8, 16, 32 y 64.
- Obtención del alcance máximo para el formato de modulación **DQPSK** en un enlace con ROADM intermedios para una velocidad de transmisión de **100Gbps** y número de canales 8, 16, 32 y 64.
- Variación de la posición de los ROADM y del número de vanos intermedios en un esquema con 8 canales y **40Gbps**.
- Variación de la posición de los ROADMs en un esquema de longitud fija con 5, 8, 16, 32 y 64 canales para **40Gbps y 100Gbps**.
- Cálculo del máximo alcance en un esquema de 5 canales y un ROADM en dos escenarios: ROADM al inicio y ROADM al final para **40Gbps y 100Gbps**.
- Comparación del alcance obtenido anteriormente (compensación de la dispersión en línea con un nuevo escenario donde la dispersión se compense en recepción).

secciones amplificadas, midiendo el BER, y más adelante establecer la condición de alcance.

El canal que se analiza en todos los casos es el canal central independientemente del número de canales que existan en el escenario. Consideramos que es el que peor se va a comportar.

Cuando se ejecuta un barrido(sweep), lo que se hace es aumentar progresivamente el parámetro 'loops'-número de secciones amplificadas- y ejecutar el escenario cada vez. Cada ejecución arroja una salida midiendo el BER. El módulo 'Const' genera un número entero por cada ejecución. Estos dos valores se entregan al VPI photonics analyzer que los representa del siguiente modo: en el eje X los valores enteros entregados por el módulo 'Const' que corresponden al número de vanos que ha atravesado la señal, y en el eje Y el BER resultante de cada ejecución.

La forma en la que VPI photonics muestra el resultado es la siguiente:

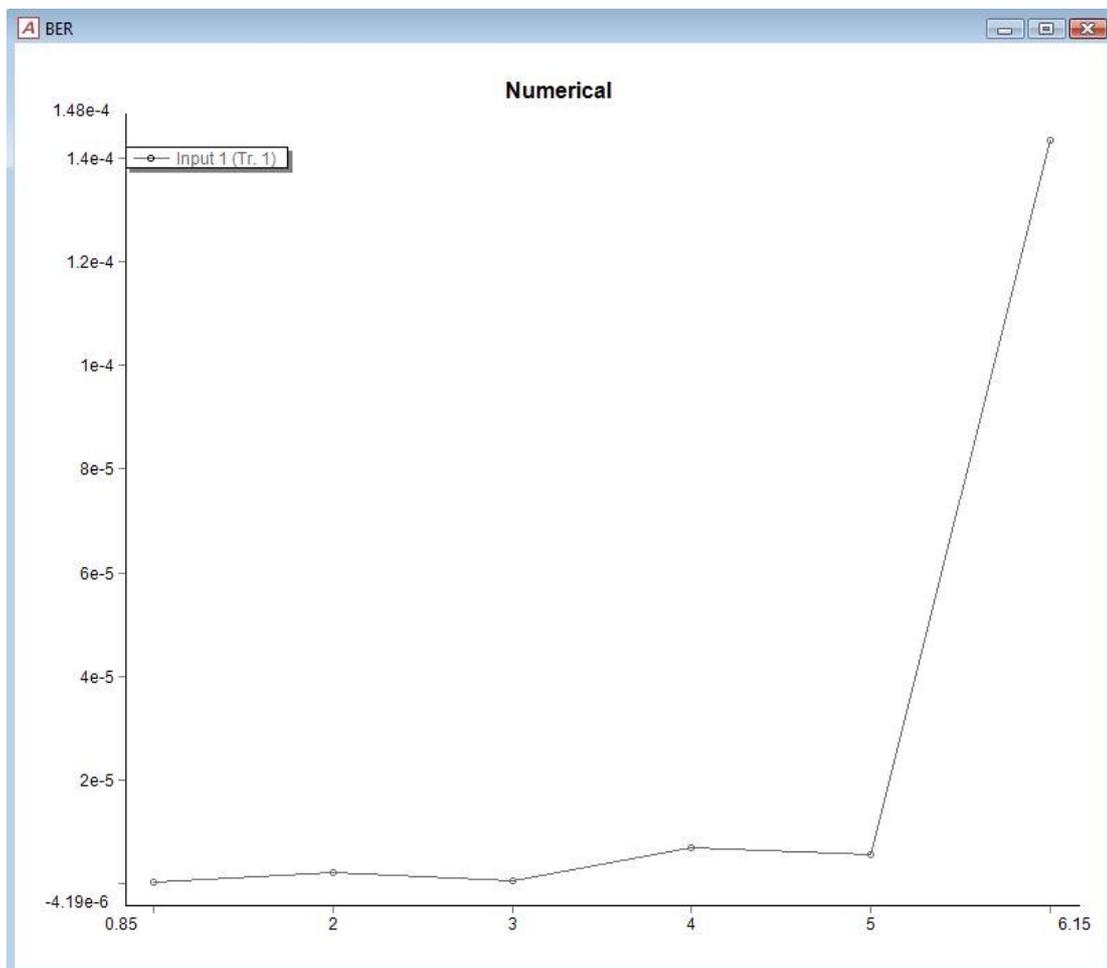


Figura 30 Medida del Alcance con VPI photonics analyzer

Para medir el alcance obtenido se busca el último valor en el eje X que corresponde en el eje Y a un valor de BER menor que $1e-4$. En el ejemplo anterior, el alcance sería de 5 vanos.

Los escenarios para 15, 31, y 63 canales son similares al mostrado para 7 canales con la única diferencia de tener mas canales.

- Multi_DQPSK_ROADM7canales(similar para 15, 31, 63 canales):

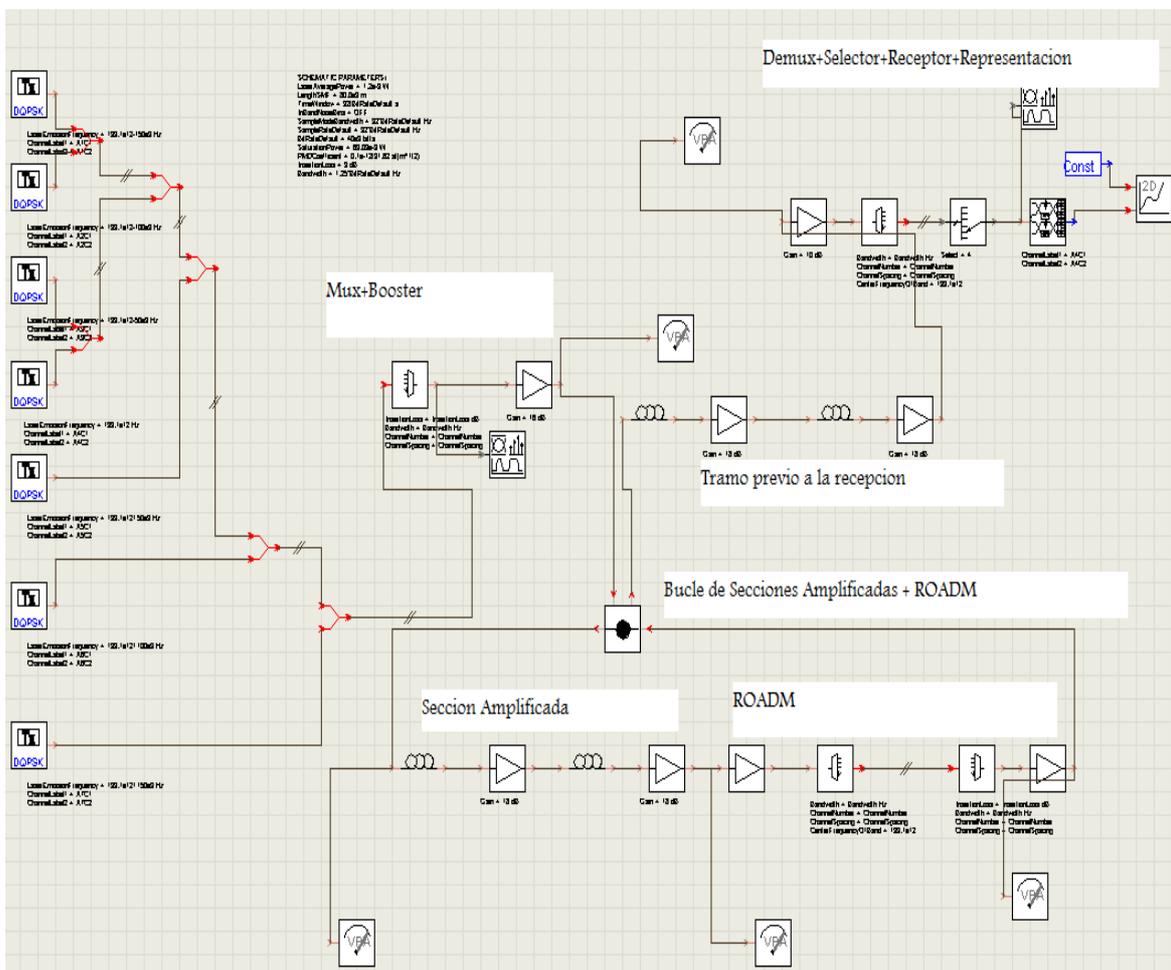


Figura 31 Escenario Multi_DQPSK_ROADM7canales

Al igual que en el escenario anterior los canales se distribuyen:

$$C_i = 193,1e12 - 50e9 \cdot N + 50e9 \cdot i. \text{ O lo que es lo mismo: } C_i = 193,1e12 + 50e9(i-N)$$

$$C_i = 193,1 \cdot 10e12 - 100e9 \cdot N + 100e9 \cdot i ; C_i = 193,1e12 + 100e9(i-N)$$

a 40G y a 100G respectivamente.

El modo en que se calcula el alcance es el mismo explicado anteriormente. La única salvedad de este escenario es que la BER se verá afectada debido a la mayor degradación que sufrirá la señal por atravesar los ROADMs. Los ROADMs en este ejemplo están equiespaciados.

-posicion_ROADM_7canales(similar para 15, 31, 63 canales):

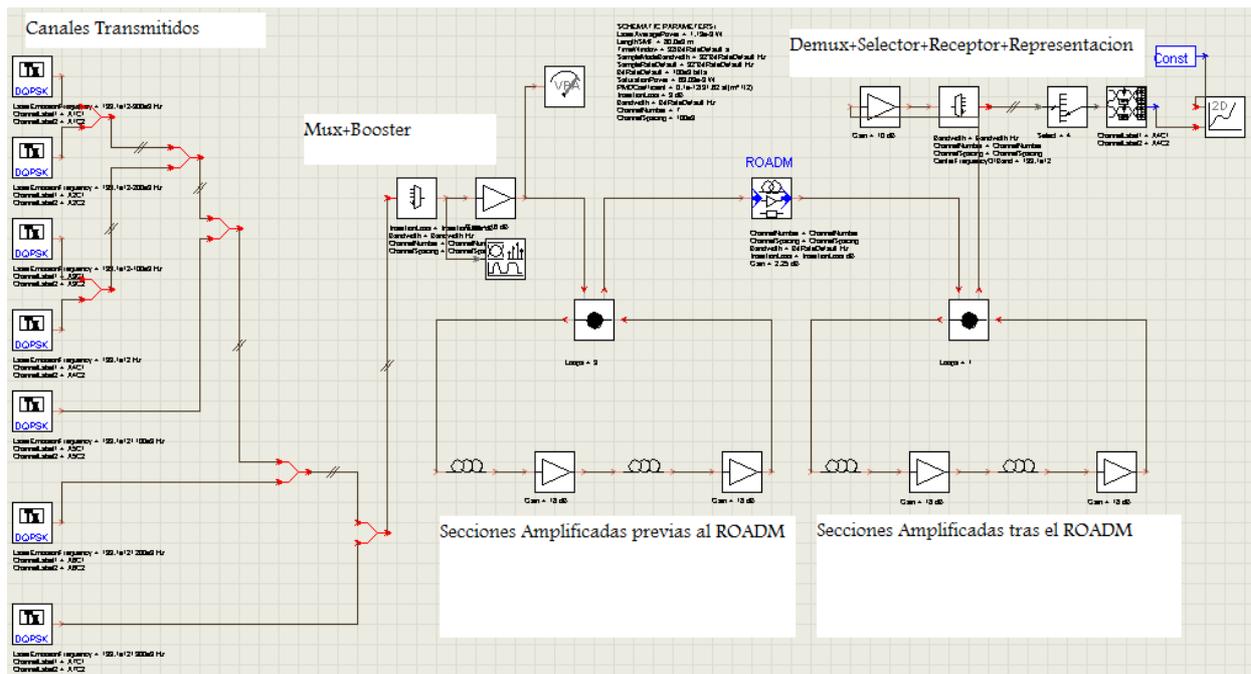


Figura 32 Escenario posición_ROADM_7canales

De nuevo, la distribución de canales vuelve a ser la misma. Para este escenario se ha creado, por comodidad un nuevo modulo que hace las funciones de ROADM, la estructura del módulo es la siguiente:

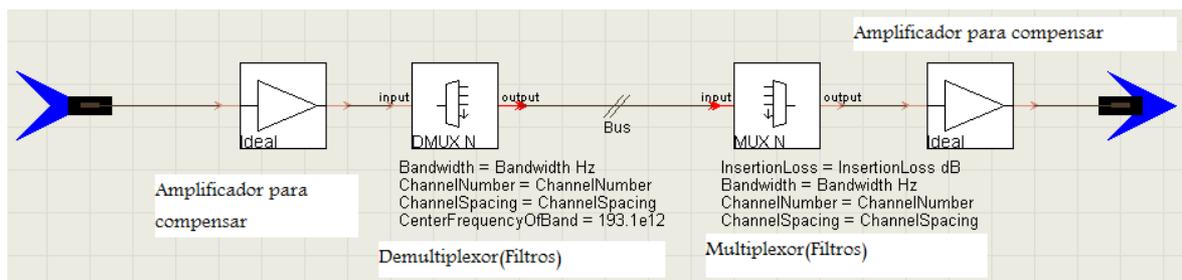


Figura 33 Esquema ROADM en VPI.

Lo que se ha pretendido con este escenario es variar la distancia entre ROADMs con objeto de esclarecer si es o no relevante donde este colocado el ROADM o si solo importa el número de ROADMs presentes

-distanciaentreROADMs(similar para 15, 31, 63 canales):

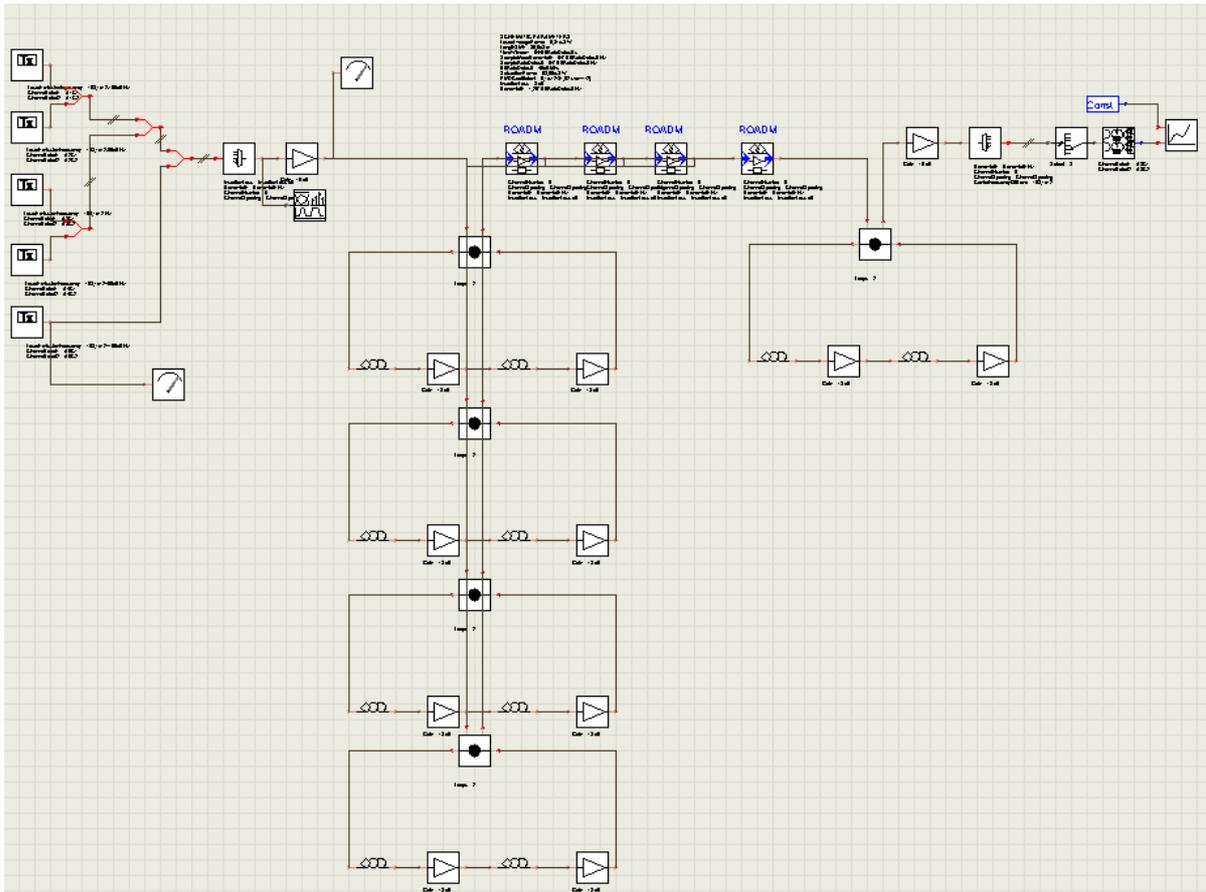


Figura 34. Escenario distanciaentreROADMs

Tiene el mismo objeto que el escenario anterior: Variar la posición de los ROADMs dentro de un esquema de longitud fija. Este escenario se ha usado también reduciendo o aumentando el número de ROADMs y variando la distancia del esquema.

La elaboración de estos escenarios ha sido gradual. Constantemente se han ajustado parámetros y se ha variado lo que fuera necesario en función del problema a resolver. Estos escenarios representan modelos genéricos que se han adaptado a las necesidades específicas de cada problema. Debido a la fuerte parametrización de los módulos presentes en VPI se ha tratado en la medida de lo posible dotar a los dispositivos de características reales buscando hojas de especificaciones de fibra, de los amplificadores, ...

En las simulaciones con ROADM se debe tener en cuenta que para que el receptor no se sature, la ganancia del segundo amplificador que compone el ROADM debe seguir la siguiente relación:

Canales	G
8	2.25 dB
16	2.16 dB
32	2.10 dB
64	2.08 dB

Tabla 5 Ganancia del segundo amplificador del ROADM

7.2.3 Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas sobre DQPSK.

7.2.3.1 Alcance sin ROADM

Haciendo uso de los escenarios Multi_DQPSK_sinROADM7canales, Multi_DQPSK_sinROADM15canales, Multi_DQPSK_sinROADM15canales y Multi_DQPSK_sinROADM63canales se obtienen los siguientes resultados:

- Número de canales: 8
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0 dBm por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	8
0.5	8
1	7

Tabla 6. DQPSK, sin ROADM, 40G, 8 canales

- Número de canales: 8
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (1.13 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
1	4

Tabla 7. DQPSK, sin ROADM, 100G, 8 canales

- Número de canales: 16
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	8
0.5	7
1	7

Tabla 8. DQPSK, sin ROADM, 40G, 16 canales

- Número de canales: 16
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
1	4

Tabla 9. DQPSK, sin ROADM, 100G, 16 canales

- Número de canales: 32
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	7
0.5	6
1	6

Tabla 10. DQPSK, sin ROADM, 40G, 32 canales

- Número de canales: 32
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	4
0.5	3
1	2

Tabla 11. DQPSK, sin ROADM, 100G, 32 canales

- Número de canales: 64
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
1	4

Tabla 12. DQPSK, sin ROADM, 40G, 64 canales

- Número de canales: 64
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	2
0.5	2
1	2

Tabla 13. DQPSK, sin ROADM, 100G, 64 canales

7.2.3.2 Simulaciones con ROADMs equiespaciados

Haciendo uso de los escenarios Multi_DQPSK_ROADM7canales, Multi_DQPSK_ROADM15canales, Multi_DQPSK_ROADM15canales y Multi_DQPSK_ROADM63canales se obtienen los siguientes resultados:

- Número de canales: 8
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (1.2 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	7
0.5	7
1	7

Tabla 14. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 8 canales

- Número de canales: 8
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (1.2 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	5
0.5	4
1	4

Tabla 15. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 8 canales

- Número de canales: 16
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
1	5

Tabla 16. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 16 canales

- Número de canales: 16
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	5
0.5	4
1	3

Tabla 17. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 16 canales

- Número de canales: 32
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
0.7	5

Tabla 18. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 32 canales

- Número de canales: 32
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	5
0.5	3
0.7	3

Tabla 19. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 32 canales

- Número de canales: 64
- Rejilla: 50 GHz
- Tasa binaria: 40 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

PMD [$\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6
0.5	6
0.7	5

Tabla 20. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 40G, 64 canales

- Número de canales: 64
- Rejilla: 100 GHz
- Tasa binaria: 100 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

PMD [$\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	2
0.5	2
0.7	0

Tabla 21. DQPSK, con ROADM equiespaciados, 100G, 64 canales

7.2.3.3 Variación de la posición de los ROADMs I

En esta prueba se ha buscado ver el efecto de la posición de los ROADM en el esquema. Para ello haciendo uso del escenario 'distanciaentreROADMs' se ha variado el número de secciones amplificadas y el número de ROADMs.

Como elemento comparativo se ha utilizado el BER, y la condición de alcance es $BER < 1e-4$.

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $7 \cdot 80 = 560$ km
- Número de ROADMs: 4
- Configuración:
origen \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow
DESTINO
(1-R-2-R-1-R-2-R-1)

Resultado: **BER = 1.56e-4**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $6 \cdot 80 = 480$ km
- Número de ROADMs: 4
- Configuración:
origen \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow
DESTINO
(1-R-2-R-1-R-1-R-1)

Resultado: **BER = 6.94e-6**

- Añadiendo un vano más al caso anterior:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $7 \cdot 80 = 560$ km
- Número de ROADMs: 4
- Configuración:
origen \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow
DESTINO
(1-R-2-R-1-R-1-R-2)

Resultado: **BER = $2.75e-5$**

- Añadiendo un vano más al caso anterior:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \cdot 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 4
- Configuración:
origen \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow
DESTINO
(1-R-2-R-2-R-1-R-2)

Resultado: **BER = $1.009e-4$**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $6 \cdot 80 = 480$ km
- Número de ROADMs: 4
- Configuración:
origen \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow
DESTINO
(1-R-1-R-1-R-2-R-1)

Resultado: **BER = $4.765e-6$**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \cdot 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow DESTINO
(2-R-2-R-2-R-2)

Resultado: **BER = 4.64e-5**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $9 \cdot 80 = 720$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow DESTINO
(2-R-3-R-2-R-2)

Resultado: **BER = 2.17e-4**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $9 \cdot 80 = 720$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow DESTINO
(2-R-2-R-3-R-2)

Resultado: **BER = 8.642e-5**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $10 \times 80 = 800$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow DESTINO
(2-R-3-R-3-R-2)

Resultado: BER = **2.43e-4**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \times 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 2 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 2 vanos \rightarrow DESTINO
(2-R-1-R-3-R-2)

Resultado: BER = **4.526e-5**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \times 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 3
- Configuración:
origen \rightarrow 3 vanos \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 1 vano \rightarrow R \rightarrow 3 vanos \rightarrow DESTINO
(3-R-1-R-1-R-3)

Resultado: BER = **2.46e-5**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \cdot 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 3 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 3 \text{ vanos} \rightarrow \text{DESTINO}$
(3-R-2-R-3)

Resultado: **BER = $2.26e-4$**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $7 \cdot 80 = 560$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 3 \text{ vanos} \rightarrow \text{DESTINO}$
(2-R-2-R-3)

Resultado: **BER = $5.424e-5$**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $7 \cdot 80 = 560$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 3 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow \text{DESTINO}$
(3-R-2-R-2)

Resultado: **BER = $2.68e-5$**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \cdot 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 4 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow \text{DESTINO}$
 (4-R-2-R-2)

Resultado: BER = **4.39e-4**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $7 \cdot 80 = 560$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 4 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 2 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 1 \text{ vano} \rightarrow \text{DESTINO}$
 (4-R-2-R-1)

Resultado: BER = **6.65e-5**

- Variando la distancia entre ROADMs:
- 40 Gbps
- 50 GHz de rejilla
- 8 canales
- 1.13 mW por canal para tener 17 dBm a la salida del booster
- Alcance: $8 \cdot 80 = 640$ km
- Número de ROADMs: 2
- Configuración:
 $\text{origen} \rightarrow 3 \text{ vanos} \rightarrow R \rightarrow 1 \text{ vano} \rightarrow R \rightarrow 4 \text{ vanos} \rightarrow \text{DESTINO}$
 (3-R-1-R-4)

Resultado: BER = **2.76e-4**

7.2.3.4 Variación de la posición de los ROADMs II

En esta parte del estudio se procedió a variar la posición de los ROADMs con objeto de esclarecer si es posible extraer una relación directa y unívoca entre el número de ROADMs en el esquema y el alcance en kms.

La estructura de las pruebas realizadas es la siguiente:

- Prueba 1A) A 100G, con 5 canales y en un esquema de longitud fija(320km) variar la posición del ROADM y calcular la BER para distintos valores de PMD.
- Prueba 1B) A 40G, con 5 canales y en un esquema de longitud fija(320km) variar la posición del ROADM y calcular la BER para distintos valores de PMD.
- Prueba 2A) A 100G, con 5 canales y un ROADM, calcular el máximo alcance en dos escenarios: ROADM al inicio, ROADM al final para distintos valores de PMD.
- Prueba 2B) A 40G, con 5 canales y un ROADM, calcular el máximo alcance en dos escenarios: ROADM al inicio, ROADM al final para distintos valores de PMD.
- Prueba 3A1) Similar a prueba 1, 8 canales, 100G.
- Prueba 3A2) Similar a prueba 1, 8 canales, 40G.
- Prueba 3B1) Similar a prueba 1, 16 canales, 100G.
- Prueba 3B2) Similar a prueba 1, 16 canales, 40G.
- Prueba 3C1) Similar a prueba 1, 32 canales, 100G.
- Prueba 3C2) Similar a prueba 1, 32 canales, 40G.
- Prueba 3D1) Similar a prueba 1, 64 canales, 100G.
- Prueba 3D2) Similar a prueba 1, 64 canales, 40G.

Prueba 1A

- 5 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- Potencia_{canal}=0dBm

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Disposición/PMD	0.1	0.3	0.5	0.7	1
160 - R - 160	3.49e-8	9.2e-8	1.96e-7	4.75e-7	1.11e-5
80 - R - 240	4.68e-8	6.48e-8	5.65e-7	4.43e-5	5.36e-4
240 - R - 80	1.35e-7	5e-7	3.24e-6	3.31e-5	4.4e-4

Tabla 22. BER en la variación de la posición de los ROADM, 5 canales, 100G

Prueba 1B

- 5 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- Potencia_{canal}=0dBm

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Disposición/PMD	0.1	0.3	0.5	0.7	1
160 - R - 160	1.26e-11	1.52e-11	1.91e-11	2.5e-11	6.75e-8
80 - R - 240	8.84e-12	1.15e-11	1.83e-11	3.58e-11	5.5e-9
240 - R - 80	2.71e-12	3.11e-12	3.89e-12	5.61e-12	1.28e-11

Tabla 23. BER en la variación de la posición de los ROADM, 5 canales, 40G

Prueba 2A

- 5 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- $Potencia_{canal}=0dBm$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,3	0,5	0,7	1
Disposición	Alcance	Alcance	Alcance	Alcance	Alcance
80+R+?	4 vanos	3 vanos	3 vanos	2 vanos	-
?+R+80	8 vanos	8 vanos	5 vanos	4 vanos	-

Tabla 24. Alcance en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 100G

Prueba 2B

- 5 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- $Potencia_{canal}=0dBm$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,3	0,5	0,7	1
Disposición	Alcance	Alcance	Alcance	Alcance	Alcance
80+R+?	5 vanos	5 vanos	5 vanos	5 vanos	5 vanos
?+R+80	6 vanos	6 vanos	6 vanos	6 vanos	6 vanos

Tabla 25 Alcance en la variación de la posición de los ROADMs, 5 canales, 40G

Prueba 3A1

- 8 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- $Potencia_{canal} = 1.2 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	2.66e-6	4.2e-5	0.018
80+R+240	4.163e-6	6.51e-5	0.010
240+R+80	2.27e-6	2.52e-6	0.002

Tabla 26. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 8 canales, 100G

Prueba 3A2

- 8 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- $Potencia_{canal} = 1.2 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	2e-7	4.91e-7	2.26e-6
80+R+240	4.97e-7	7.3e-7	1.59e-6
240+R+80	3.54e-8	8.5e-8	8.31e-7

Tabla 27. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 8 canales, 40G

Prueba 3B1

- 16 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.529 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	5.87e-6	4.56e-5	0.002
80+R+240	1.7e-5	2.32e-4	0.007
240+R+80	4.26e-6	1.74e-5	0.001

Tabla 28. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 16 canales, 100G

Prueba 3B2

- 16 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.529 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	2.4e-10	1.55e-9	1.195e-7
80+R+240	5.11e-9	1.09e-7	1.09e-7
240+R+80	2.64e-10	3.44e-8	4.36e-7

Tabla 29. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 16 canales, 40G

Prueba 3C1

- 32 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.3 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	1.24e-4	1.5e-3	1.34e-2
80+R+240	1.3e-3	4.9e-3	2.6e-2
240+R+80	4.21e-4	1.5e-3	1.03e-2

Tabla 30. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 32 canales, 100G

Prueba 3C2

- 32 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.3 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	1.32e-6	2.66e-6	6.12e-6
80+R+240	7.98e-6	8.82e-6	1e-5
240+R+80	1.43e-8	1.78e-8	5.2e-7

Tabla 31. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 32 canales, 40G

Prueba 3D1

- 64 canales
- 100Gbps
- Rejilla: 100Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.15 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	1.06e-4	5.82e-4	3.7e-2
80+R+240	2.5e-3	3.4e-4	2.6e-2
240+R+80	3.6e-4	4.5e-4	3.7e-2

Tabla 32. BER en la variación de la posición de los ROADMs, 64 canales, 100G

Prueba 3D2

- 64 canales
- 40Gbps
- Rejilla: 50Ghz
- $Potencia_{canal} = 0.15 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

PMD	0,1	0,5	1
Disposición	BER	BER	BER
160+R+160	2.88e-4	4.6e-4	8.99e-4
80+R+240	7.24e-4	1.3e-3	3.5e-3
240+R+80	7.80e-5	9.69e-5	3.13e-4

Tabla 33. . BER en la variación de la posición de los ROADMs, 64 canales, 40G

7.2.3.5 Compensación de la dispersión cromática en recepción

- Número de canales: 8
- Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 40 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (1.4 mW por canal)

G = 13.8 – 13.8

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	12

Tabla 34. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 8 canales, 40G

- · Número de canales: 8
- · Rejilla: 100 GHz
- · Tasa binaria: 100 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (1.4 mW por canal)

G = 13.9-13.8

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	7-8

Tabla 35. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 8 canales, 100G

- · Número de canales: 32
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 40 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

G=13.9-13.8

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	10-11

Tabla 36. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 32 canales, 40G

- · Número de canales: 32
- · Rejilla: 100 GHz
- · Tasa binaria: 100 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

G=13.9-13.8

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	6

Tabla 37. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 32 canales, 100G

- · Número de canales: 64
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 40 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

G=13.9-13.8

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	9-10

Tabla 38. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 64 canales, 40G

- · Número de canales: 64
- · Rejilla: 100 GHz
- · Tasa binaria: 100 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

G=14-14

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos (Longitud de vano = 80 km)
0.1	2-3

Tabla 39. Compensación de la dispersión en recepción DQPSK, 64 canales, 100G

7.3 POLMUX

7.3.1 Consideraciones previas

Como se explico anteriormente, el modo en que se ha implementado el formato de modulación POLMUX no ha sido estricto. Al no poder establecer un escenario POLMUX estricto se ha optado por acometer una aproximación.

La aproximación utilizada ha consistido en suponer que en recepción los dos modos presentes en POLMUX se encuentran perfectamente alineados por lo que podemos estimar que nos encontramos ante dos flujos DQPSK de 50 Gbps.

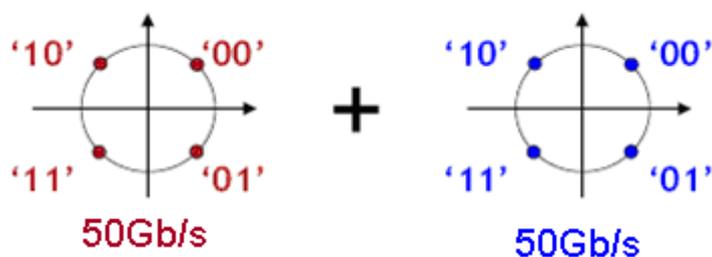


Figura 35 POLMUX como suma de dos flujos DQPSK

Por lo tanto, y a efectos de simulaciones lo que se ha considerado ha sido un escenario donde la señal transmitida se encuentra modulada en DQPSK y la tasa binaria son 50Gbps.

7.3.2 Pruebas

En cuanto a la simulación **POLMUX** se han desarrollado las siguientes tareas:

- Obtención del alcance máximo para el formato de modulación **POLMUX** en un enlace sin ROADM intermedios (pero sí en emisión y recepción) para una velocidad de transmisión de **100Gbps** (DQPSK50G) y número de canales 8, 16, 32 y 64 (El alcance máximo, en todos los casos, se mide como el número de secciones de regeneración, siendo la longitud cada una de ellas de 80km).
- Comparación del alcance obtenido anteriormente (compensación de la dispersión en línea con un nuevo escenario donde la dispersión se compense en recepción).
- No se han considerado simulaciones con ROADM porque el efecto causado sobre la señal puede observarse en las simulaciones de DQPSK.

7.3.3 Resultados

7.3.3.1 Máximo alcance sin ROADMs

NOTA: En la tercera columna de cada tabla aparecen los resultados que se obtenían con DQPSK 100G a modo de comparación.

- · Número de canales: 8
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (1.13 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos POLMUX (DQPSK – 50G)	Nº de vanos DQPSK – 100G
0.1	7	6
0.5	7	6
1	6	4

Tabla 40. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 8 canales

- · Número de canales: 16
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos POLMUX (DQPSK – 50G)	Nº de vanos DQPSK – 100G
0.1	7	6
0.5	6	6
1	6	4

Tabla 41. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 16 canales

- · Número de canales: 32
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos POLMUX (DQPSK – 50G)	Nº de vanos DQPSK – 100G
0.1	6	4
0.5	6	3
1	5	2

Tabla 42. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 32 canales

- · Número de canales: 64
- · Rejilla: 50 GHz
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

PMD [ps/(km) ^{1/2}]	Nº de vanos POLMUX (DQPSK – 50G)	Nº de vanos DQPSK – 100G
0.1	5	2
0.5	5	2
1	4	2

Tabla 43. POLMUX sin ROADM VS DQPSK 100G sin ROADM, 64 canales

7.3.3.2 Compensación de la dispersión cromática en recepción

- Número de canales: 8
- Rejilla: 50 GHz
- PMD: 0.1 ps/(km)^{1/2}
- Tasa binaria: 50 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (1.13 mW por canal)

Tipo Compensación	Nº de vanos Longitud de vano: 80km.
DCF-Fibra	7
DCM-Recepción	8

Tabla 44. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 8 canales

- Número de canales: 16
- Rejilla: 50 GHz
- PMD: 0.1 ps/(km)^{1/2}
- Tasa binaria: 50 Gbps
- Potencia salida del booster: 17dBm (0.529 mW por canal)

Tipo Compensación	Nº de vanos Longitud de vano: 80km.
DCF-Fibra	7
DCM-Recepción	9

Tabla 45. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 16 canales

- · Número de canales: 32
- · Rejilla: 50 GHz
- · PMD: 0.1 ps/(km)^{1/2}
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.3 mW por canal)

Tipo Compensación	Nº de vanos Longitud de vano: 80km.
DCF-Fibra	6
DCM-Recepción	8

Tabla 46. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 32 canales

- · Número de canales: 64
- · Rejilla: 50 GHz
- · PMD: 0.1 ps/(km)^{1/2}
- · Tasa binaria: 50 Gbps
- · Potencia salida del booster: 17dBm (0.15 mW por canal)

Tipo Compensación	Nº de vanos Longitud de vano: 80km.
DCF-Fibra	5
DCM-Recepción	7

Tabla 47. Compensación de la dispersión en recepción POLMUX, 64 canales

8 Conclusiones y trabajo futuro

8.1 Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos se procede en esta parte del estudio a extrapolar conclusiones.

Las conclusiones se centran en distintos aspectos de importancia:

- DQPSK
 - Máximo Alcance sin ROADM y con ROADMs equiespaciados.
 - Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.
 - Efecto de la variación de la posición de los ROADMs

- POLMUX
 - Máximo Alcance sin ROADM
 - Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.

- DQPSK VS POLMUX
 - Comparación de las prestaciones, en lo que se refiere a alcance sin ROADM intermedios.

Por tanto, se evaluarán los aspectos descritos anteriormente. Como elemento de medida se establece el BER si nos encontramos en un escenario de longitud fija o el alcance obtenido (expresado como número de vanos atravesados) si lo que se fija es el número de ROADMs.

Las simulaciones, utilizan la misma secuencia binaria en cada ejecución por lo que se puede considerar que la comparación está correctamente establecida.

Cabe destacar que en el caso de POLMUX, al no haberse simulado un escenario perfecto, los resultados pueden ser un poco mejor que los reales. A los resultados mostrados en este estudio habría que añadir un empeoramiento debido al penalty producido por una posible desalineación de los modos de polarización.

8.1.1 DQPSK

8.1.1.1 Máximo Alcance sin y con ROADM

La tabla que sigue muestra una comparación entre los máximos y mínimos alcances obtenidos para DQPSK a 40G y 100G, con y sin ROADMs intermedios. Entendiendo por máximo y mínimo alcance el mejor y el peor caso de los estudiados. Esto nos dará una medida de cómo se ve afectado el alcance al añadir más canales y más PMD, para 40G y 100G.

El mejor caso será siempre el que corresponde a 8 canales y $PMD=0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$. Mientras que el peor caso será el que corresponde a 64 canales y $PMD=1 \text{ ps/km}^{1/2}$. Estos dos valores son los extremos del conjunto de resultados por lo que podemos comparar entre 40G y 100G que valores están más dispersos.

El alcance se expresa en número de vanos y cada vano representa una distancia de 80km. El alcance será el número de vanos que aseguren una $BER < 10^{-4}$.

	MaxAlcance sin ROADM (8 c/0,1 ps/km ²)	MinAlcance sin ROADM (64 c/1 ps/km ²)	MaxAlcance con ROADM (8 c/0,1 ps/km ²)	Min Alcance con ROADM (64c/ 1 ps/km ²)
40G	8 vanos	4 vanos	7 vanos	5 vanos
100G	6 vanos	2 vanos	5 vanos	0 vanos

Tabla 48 Comparación de los máximos y mínimos alcances con y sin ROADM

La introducción de ROADMs hace que se penalice aproximadamente en 1 vano en la mayoría de casos.

A 100G la PMD penaliza más que a 40G, y esto se hace más acusado al aparecer ROADM intermedios. De modo que con 64 canales, $1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ de PMD y 100G ni siquiera se alcanza 1 vano.

A 40G el mínimo alcance sin ROADMs es mayor que el mínimo alcance con ROADMs. Esto puede deberse a algún desajuste de las simulaciones.

Al introducir más canales, la transmisión a 100G se ve más afectada que la transmisión a 40G.

A continuación se muestran una serie de gráficas que comparan el máximo alcance obtenido con y sin ROADM a 40G y a 100G para los valores de PMD 0.1, 0.5 y $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

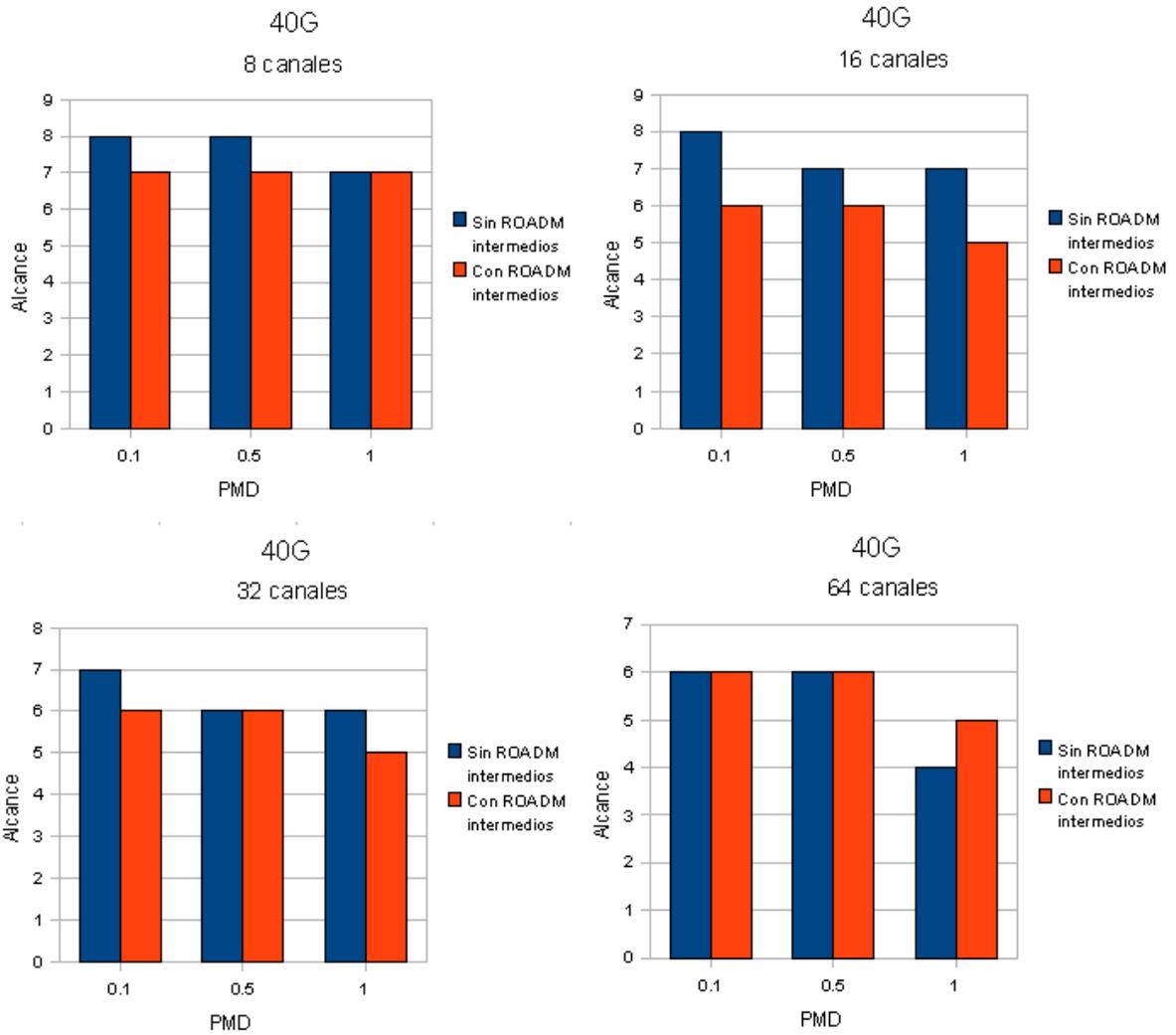


Figura 36 Comparación de los alcances máximos a 40G con y sin ROADM

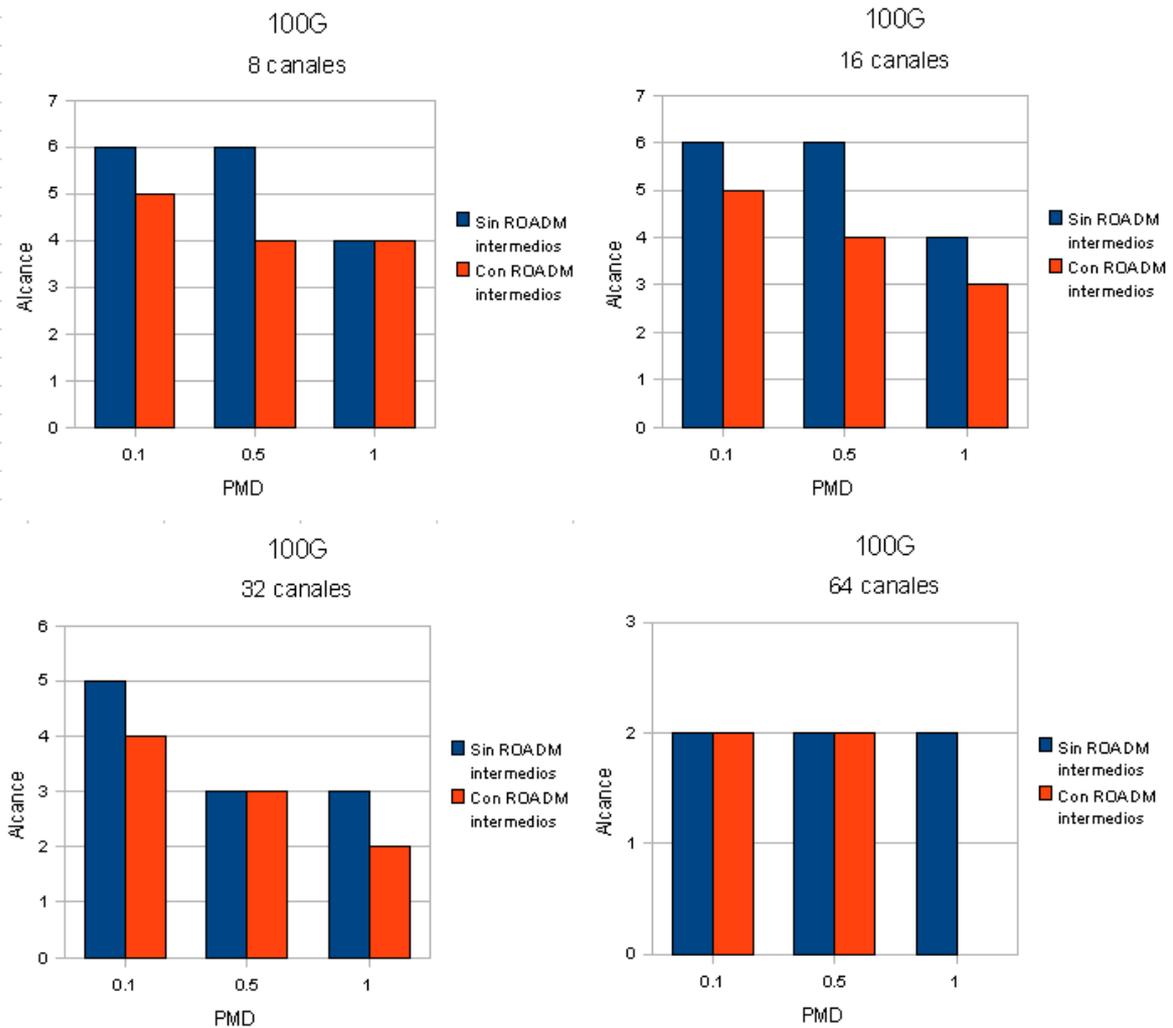


Figura 37 Comparación de los alcances máximos a 100G con y sin ROADMs

Estos resultados confirman las suposiciones teóricas (la transmisión a 100Gbps se ve más afectada por la PMD que la transmisión a 40Gbps), tales como:

- La PMD a 40G apenas afecta, a menos que sea un valor muy elevado.
- A 100G, la influencia de la PMD es muy alta llegando incluso a no poderse transmitir ni un vano con 64 canales y $1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ de PMD.
- El aumento del número de canales afecta mucho más a la transmisión a 100G.

De todos modos, también se puede observar que la transmisión de señales DQPSK a 100G es factible, y que en un escenario real que puede tener distancias entre nodos comprendidas entre 300 km y 400 km el alcance obtenido tanto con y sin ROADMs es razonable.

La distancia que deben salvar las señales sin ROADMs se encuentra entre 300 o 400 kms. Esto corresponde en el presente estudio a 5 secciones amplificadas de 80 Km.

A 100G, y con 32 canales puede alcanzarse esta distancia con un valor de PMD bajo (mejorar la fibra). Por encima de los alcances dados más arriba solo cabe la regeneración electrónica de la señal.

POLMUX podría presentar una solución a este problema de distancias ya que la degradación de la señal será menor al comportarse como un DQPSK-50G. La implementación de POLMUX se traduce en cambio en un mayor precio de los equipos.

8.1.1.2 Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.

Las pruebas realizadas, como se explicó anteriormente, también comprenden un estudio sobre la compensación de la dispersión cromática.

Se estudian, en particular, dos casos: 1) Compensación de la dispersión en línea (mediante fibra compensadora de la dispersión (DCF)) y 2) Compensación de la dispersión en recepción (mediante un módulo compensador de la recepción (DCM)).

A continuación se expone una gráfica que muestra la ganancia obtenida por compensar la dispersión en recepción a 40G para 8, 32 y 64 canales:

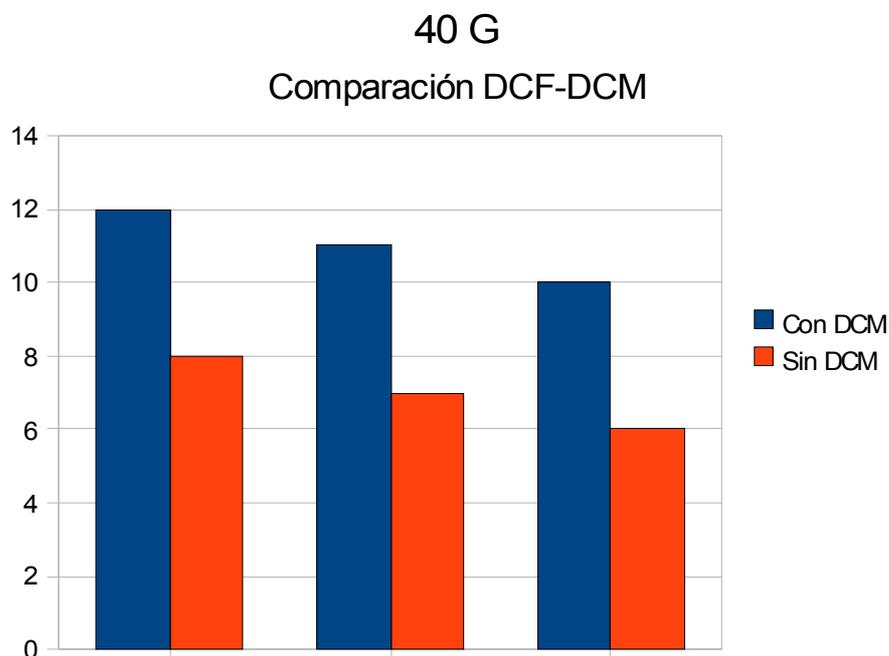


Figura 38 Alcance en vanos compensando en recepción y en línea para 40G

Y, para 100G:

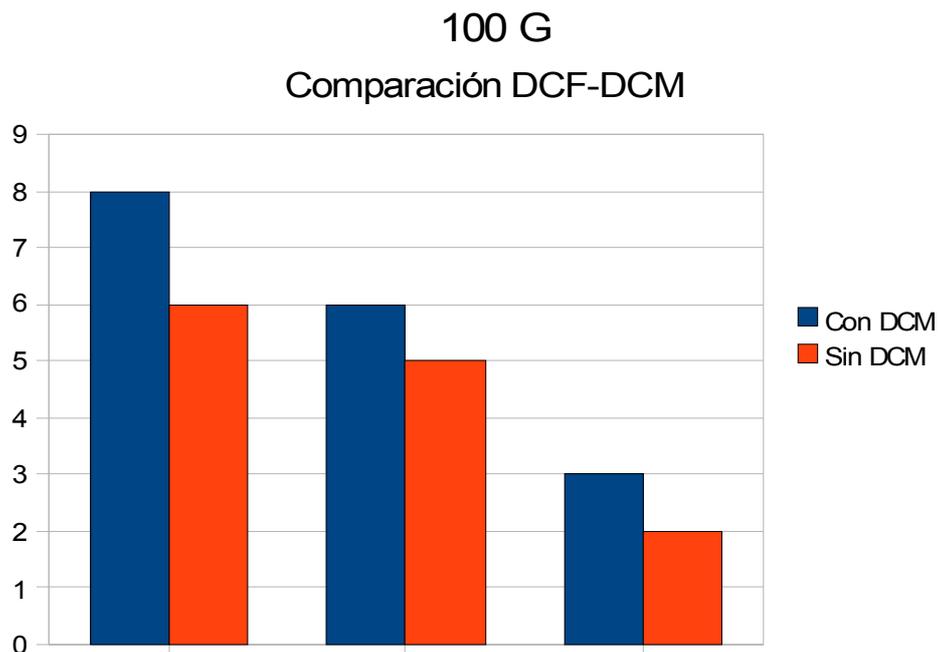


Figura 39 Alcance en vanos compensando en recepción y en línea para 100G

Se puede observar que la mejora introducida por el uso de módulos compensadores de dispersión en recepción es notable. Sin embargo la mejora que se produce a 40G es bastante más significativa que la que se produce a 100G.

Esto puede deberse a varios motivos. Probablemente el problema es que la transmisión a 100G no está tan limitada por ruido como lo está la de 40G. Es decir, la transmisión a 100G sufre una limitación debida fundamentalmente a la PMD de la fibra. Y por tanto el hecho de introducir la compensación -que no es más que restar atenuación al esquema y así poder reducir la ganancia de los amplificadores reduciendo así el ruido que estos introducen- no aporta tanto como en 40G para que el alcance aumente.

Por otra parte, para estudiar que opción es mejor debería estudiarse si es rentable el uso de equipos que compensen en recepción ya que sería una opción más cara que compensar en línea.

8.1.1.3 Estudio de la variación de la posición de los ROADMs

Se han realizado multitud de pruebas para estudiar en que modo afecta la colocación de los ROADMs al alcance obtenido.

De la primera prueba realizada para analizar el efecto de la Variación de la posición de los ROADMs, Apartado I) se deduce lo siguiente:

- Sin ROADMs intermedios, el alcance máximo es de 8 vanos
- En el momento en que añadimos un ROADM intermedio(o 2 o 3 así hasta 6), penalizamos en 80 km (un vano) el alcance. En el caso de añadir 6 ROADMs el alcance máximo se reduciría a 160 km.

Del resto de pruebas realizadas (Apartado II) se deduce lo siguiente:

- En este apartado, las pruebas que se han realizado miden el BER en un esquema de longitud fija, en concreto 320km.
- En este esquema hay un ROADM presente que se puede encontrar: al inicio, en el medio o al final.
- Las configuraciones son las siguientes: esquema 1: 160 km + ROADM + 160 km, esquema 2: 80 km + ROADM + 240 km, y esquema 3: 240 km + ROADM + 80 km.
- En cada configuración, se han realizado pruebas para tres valores de PMD: 0.1, 0.5 y 1 ps/km^{1/2}.
- De los resultados se deduce lo siguiente:
 - Para un mismo valor de PMD, es decir misma PMD en los tres esquemas distintos, la B.E.R. presenta una variación máxima de un orden de magnitud.
 - En la mayoría de casos, el esquema que mejor se comporta es el que presenta el ROADM al final. Es decir el esquema 240 km + ROADM + 80 km. Esto significa que el ROADM tiene menos influencia sobre la señal más atenuada.
 - Por tanto, no podemos afirmar que la posición del ROADM en el esquema no afecte al alcance pero sí podemos contemplar que no afecta en gran medida. Es decir la variación del BER está acotada en un orden de magnitud. Lo que podría considerarse asumible.

8.1.2 POLMUX

8.1.2.1 Máximo Alcance sin ROADM

De las pruebas realizadas sobre POLMUX se deduce que el alcance es mayor que el obtenido en DQPSK (se verá en el apartado DQPSK vs POLMUX).

Aparte de esto cabe destacar:

- La influencia de la PMD es mucho menor que la que soporta DQPSK-100G. Esto supone una ventaja ya que significa que no haría falta invertir en una fibra mejor si no que podría conservarse la planta actual
- Las distancias de un esquema real (que serían de unos 400km) serían fácilmente alcanzables con este formato de modulación.
- El único problema que presenta POLMUX es el coste de los equipos y la complejidad que introduce.

8.1.2.2 Compensación de la CD (Dispersión Cromática) en línea VS Compensación en recepción.

A continuación se muestra la mejora introducida por el uso de DCMs en el esquema POLMUX para 8, 16, 32 y 64 canales:

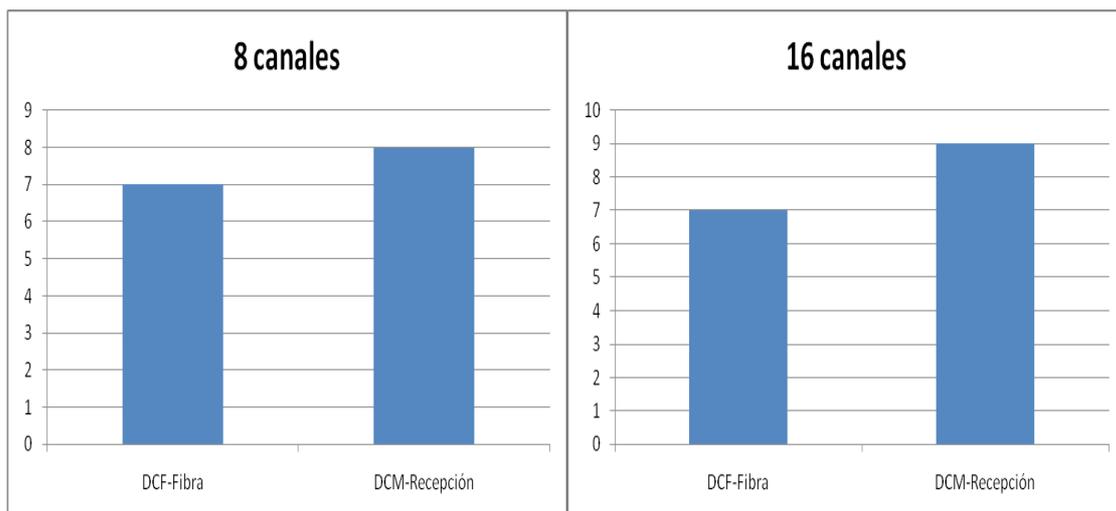


Figura 40 Mejora debida a la compensación de la CD en recepción para 8 y 16 canales

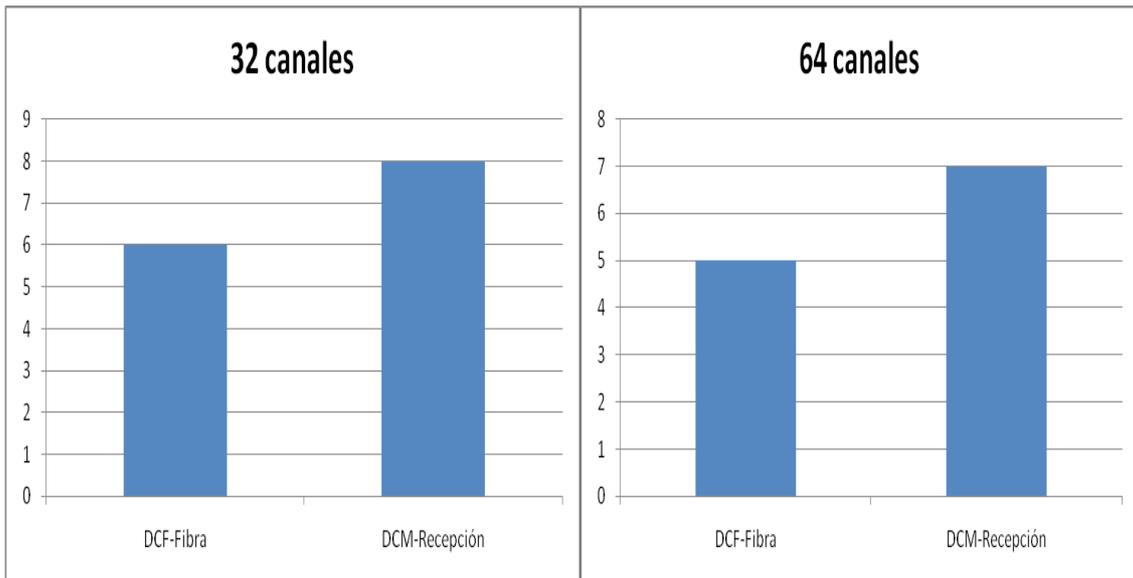


Figura 41 Mejora debida a la compensación de la CD en recepción para 32 y 64 canales

- La mejora introducida es notable, pero no se acerca al caso de DQPSK40G donde se ganaban bastantes más vanos. Este hecho, probablemente se deba a que la transmisión a 100G se ve limitada por otros factores (PMD) antes que por el ruido, y el hecho de restar atenuación al esquema mejora pero no tanto como en 40G.
- La decisión girará de nuevo en torno a los costes de los equipos. Habría que estudiar si el alcance mejorado merece verdaderamente la pena.

8.1.3 DQPSK vs POLMUX

A continuación se muestran unas gráficas comparativas de ambos formatos de modulación. En ellas se muestra el alcance -en vanos- obtenido para distintos valores de PMD y para 8, 16, 32 y 64 canales.

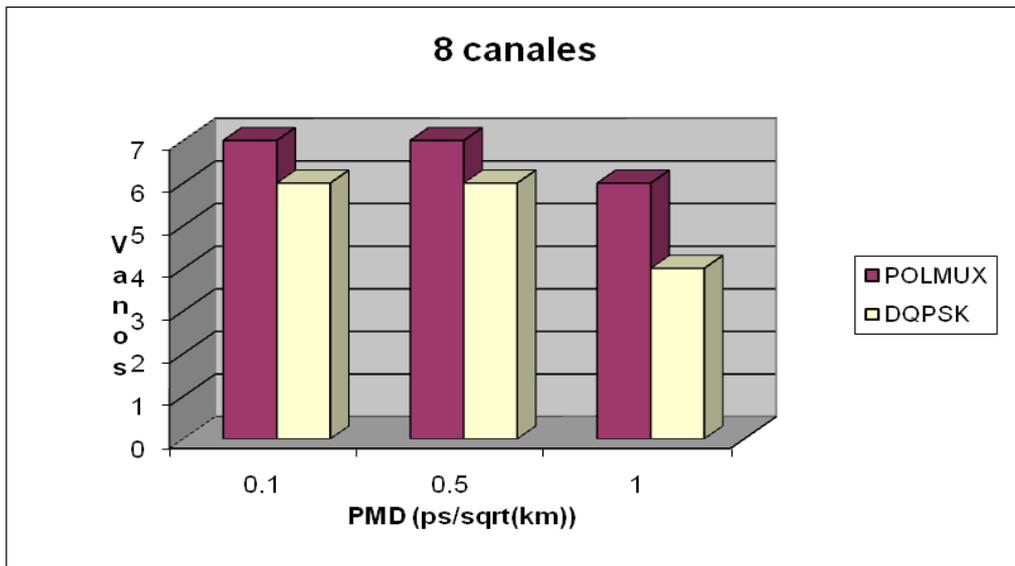


Figura 42 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 8 canales

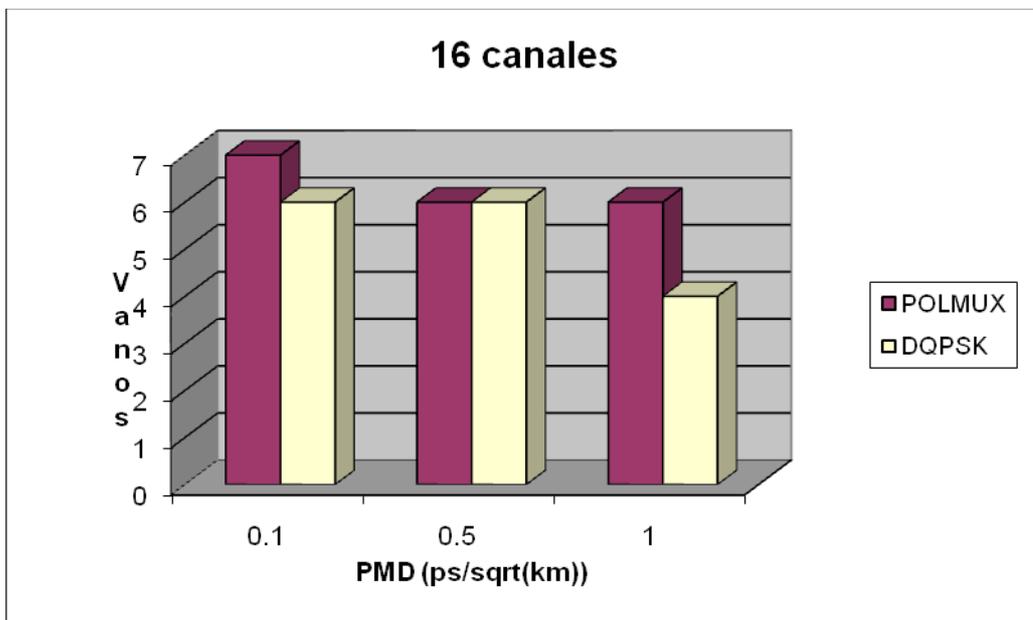


Figura 43 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 16 canales

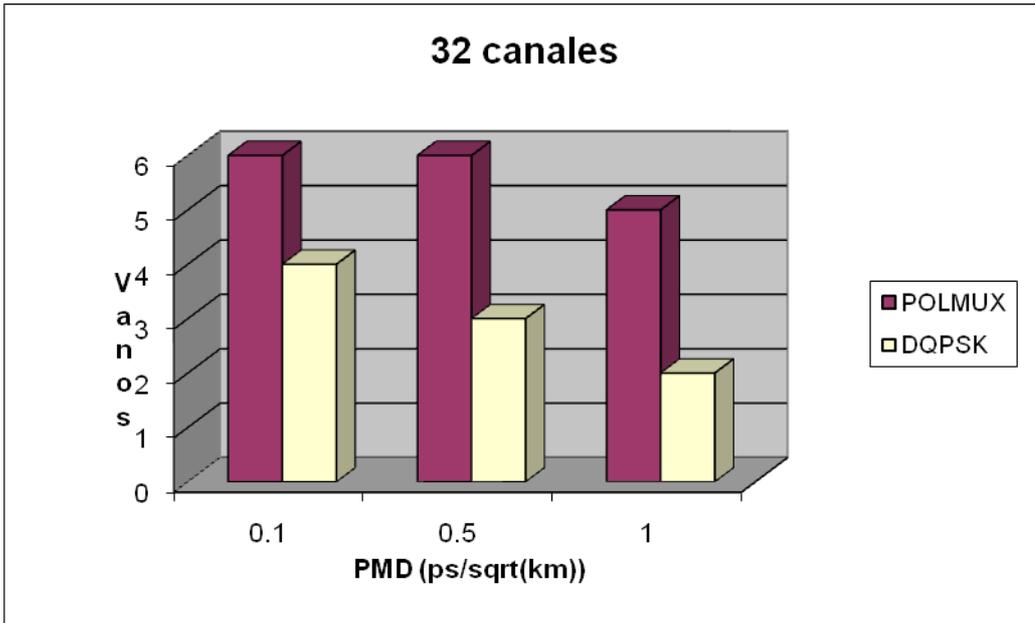


Figura 44 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 32 canales

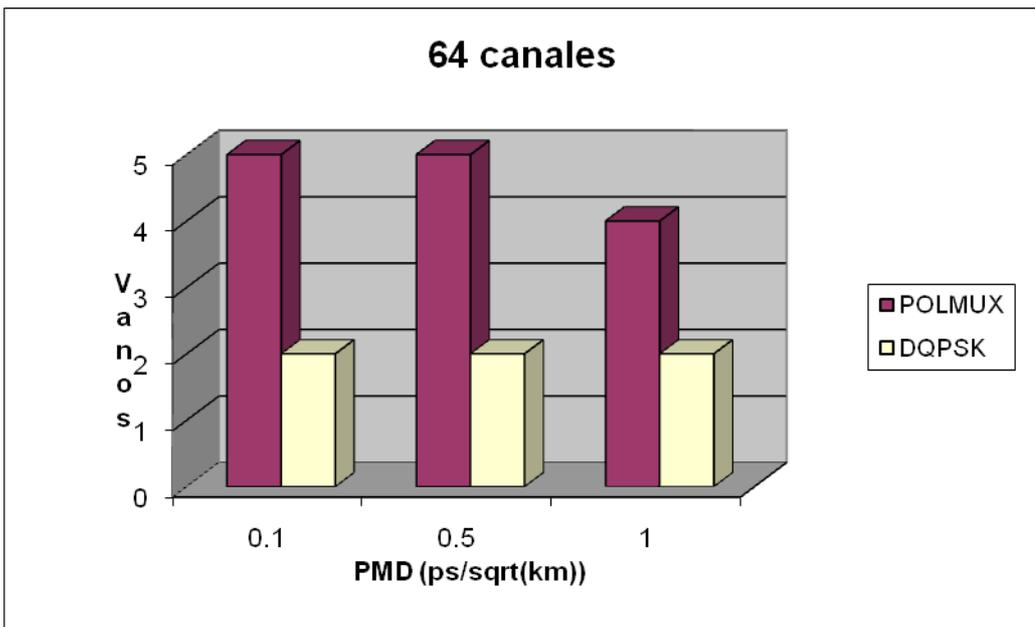


Figura 45 Comparación del alcance sin ROADMs entre DQPSK y POLMUX, 64 canales

Como se ha ido mostrando a lo largo del estudio las diferencias entre ambos formatos de modulación son notables. El hecho de que uno ofrezca mejores prestaciones no significa, definitivamente, que sea la mejor opción.

Ha de tenerse en cuenta también que en el presente estudio, no se ha simulado POLMUX puramente si no que se ha realizado una aproximación (DQPSK 50G) por lo que puede que las prestaciones reales empeoren un poco.

Un factor muy importante a tener en cuenta es la actual planta de fibra. Es decir, podría elegirse POLMUX como formato de modulación y conservar la planta de fibra actual que presenta unos valores de dispersión (incluyendo PMD) y atenuación bastante elevados.

Pero quizás, conservar la planta de fibra sea una solución a corto plazo, y no merezca la pena hacer una fuerte inversión en equipamiento -que requeriría POLMUX- para cinco o diez años más tarde tener que cambiar la fibra. Si se produjera un avance en la tecnología de creación de la fibra óptica y un abaratamiento de su provisión y despliegue puede que a medio plazo, el sustituir la planta de fibra por una de nueva generación suponga una mejor opción que el gasto en equipos y mantenimiento que puede suponer implementar POLMUX.

8.2 Trabajo futuro

Tras el trabajo realizado, hay ciertos aspectos en los que resultaría interesante ahondar, desde aquí se proponen:

- Mejora en el modelado del ROADM. Incluir el modelo con 4 WSS y distintas funciones de filtrado.
- Estudio de otros formatos de modulación aptos para estas velocidades como puede ser partial-DPSK.
- Implementación en VPI del formato de modulación POLMUX de un modo puro. Manteniendo la polarización a lo largo de la fibra.
- Estudio de algún método de compensación de la PMD.
- Medida con VPI de Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) en distintos escenarios.

Referencias

- [1] Agrawal, G. P.
“Fiber-optic communication systems”.
Wiley-Interscience, 2002
- [2] Aguilar, Antonio.
Apuntes Asignatura “Comunicaciones Ópticas”,
2006-2007
- [3] Telefónica I+D:
Documento Interno.
- [4] Khrais N, Elrefaie A, Wagner R, Ahmed S,
“Performance of Cascaded Misaligned Optical (De)multiplexers in Multiwavelength Optical Networks”,
IEEE Photonics Technology Letters, V8, N8, Aug 1996, 1073-1075.
- [5] J. P. Gordon and H. Kogelnik
“PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers”
PNAS April 25, 2000 vol. 97 no. 9 4541-4550
- [6] Masahiro Daikoku, Itsuro Morita, Hidenori Taga, Hideaki Tanaka,
Tetsuya Kawanishi, Takahide Sakamoto, Tetsuya Miyazaki, and Takahisa Fujita
“100Gbit/s DQPSK Transmission Experiment without OTDM for 100G Ethernet Transport”
National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1, Nukui-Kita,
Koganei-shi, Tokyo 184-8795, Japan
- [7] Fludger, C.R.S. Duthel, T. van den Borne, D. Schulien, C. Schmidt, E.-D. Wuth,
T. Geyer, J. De Man, E. Khoe Giok-Djan de Waardt, H. CoreOptics GmbH,
Nurnberg;
“Coherent Equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for Robust 100-GE Transmission”
Lightwave Technology, Journal of Publication Date: Jan.1, 2008 Volume: 26, Issue: 1
On page(s): 64-72
- [8] Khrais N, Elrefraie A, Wagner R, **“Performance Degradation of WDM Systems Due to Laser and Optical Filter Misalignments”** Electron Lett., V31,
N14, 1995, 1179-1180.
- [9] Almström E, Larsson S, Carlden H, **“Cascadability of Optical Add/drop Multiplexers”**, ECOC'98, 589-590.

[10] **Filter Concatenation Effects in Optical Networks**

G. Dhosy+ and J. Turner+

[11] Ross Saunders, Gary Nicholl et al.

“Can 100Gb/s wavelengths be deployed using 10Gb/s engineering rules”.

Cisco systems Inc.

[12] Peter Winzer, René-Jean Essiambre.

“Advanced optical modulation formats”.

Proceedings of the IEEE. Vol 94, N° 5, mayo de 2006.

Glosario

AMS-IX	Amsterdam Internet Exchanged
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Gratings
BER	Bit error rate
CAPEX	Capital Expenditure
CD	Chromatic Dispersion
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DCM	Dispersion Compensation Module
DP-QPSK	Dual polarization quadrature phase shift keying
DQPSK	Diferential Quadrature Phase Shift Keying
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Dopped Fiber Amplifier
FBG	Fibre Bragg Gratings
FEC	Forward Error Correction
IPTV	IP Television
LTE	Long Term Evolution
MSAN	Multi Service Access Node
NRZ	Non-return-to-Zero
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
PBB	Provider Backbone Bridging
PBB-TE	Provider Backbone Bridging Traffic Engineering
PMD	Polarization Mode Dispersion
PXC	Pure Optical Cross Connect

ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SAN	Storage Area Network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
TFF	Thin Film Filter
T-MPLS	Transport Multiprotocol Label Switching
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VoD	Video On Demand
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switching

PRESUPUESTO

- 1) **Ejecución Material**
 - Compra de ordenador personal..... 1200 €
 - Compra de la licencia del simulador.....2000 €
 - Total de ejecución material.....3200 €
- 2) **Gastos generales**
 - 16 % sobre Ejecución Material..... 512 €
- 3) **Beneficio Industrial**
 - 6 % sobre Ejecución Material.....1920 €
- 4) **Honorarios Proyecto**
 - 160 horas a 15 € / hora..... 2400 €
- 5) **Material fungible**
 - Gastos de impresión..... 50 €
 - Encuadernación.....20 €
- 6) **Subtotal del presupuesto**
 - Subtotal Presupuesto..... 5720 €
- 7) **I.V.A. aplicable**
 - 16% Subtotal Presupuesto..... 915 €
- 8) **Total presupuesto**
 - Total Presupuesto.....6635 €

Madrid, Enero de 2009

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Enrique Iglesias Rodríguez
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un **“Estudio sobre Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad”**. 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 partidaalzada 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.