

FIXED GRID Y FLEXIBLE GRID: EVOLUCIÓN A EON

Autor: Jorge Enrique Quintana del Barrio
Profesor: Josep María Fábregas Sánchez
Máster en Ingeniería de Telecomunicación
Enero 2021

FICHA DEL TRABAJO

Título del trabajo:	<i>Fixed Grid y Flexible Grid: Evolucion a EON</i>
Nombre del autor:	<i>Jorge Enrique Quintana del Barrio</i>
Nombre del colaborador docente:	<i>Josep María Fábrega Sánchez</i>
Nombre del PRA:	<i>Jose Antonio Morán Moreno</i>
Fecha de entrega:	<i>01/2021</i>
Titulación o programa:	<i>Máster en Ingeniería de Telecomunicación</i>
Area del trabajo final:	<i>Comunicaciones ópticas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave:	<i>Rejilla fija, Rejilla flexible, Slice</i>
Resumen del trabajo:	
<p><i>El proyecto se centra en analizar las diferencias entre la distribución de rejilla fija y la distribución de rejilla flexible dentro de las redes ópticas. La comparación nos arroja las ventajas de la rejilla flexible, argumentando así la evolución de las redes ópticas a redes ópticas elásticas.</i></p> <p><i>Para realizar este análisis, se ha fijado un caso de uso, así como unos requerimientos básicos que ha de cumplir la solución, relativos a capacidad, eficiencia, escalabilidad y coste.</i></p> <p><i>No solo se estudian las principales soluciones de distribución de rejilla, sino que se realiza un ligero análisis de otras alternativas que aportan valor a la solución final, como son la arquitectura Slice, la multiplexación SDM y la multiplexación DSDM.</i></p>	
Abstract:	
<p><i>The project focuses on analyzing the differences between fixed grid distribution and flexible grid distribution within optical networks. The comparison gives us the advantages of the flexible grid, arguing the evolution of optical networks to elastic optical networks.</i></p> <p><i>To carry out this analysis, a use case has been established, as well as some basic requirements that the solution has to meet, regarding capacity, efficiency, scalability and cost.</i></p> <p><i>Not only the main grid distribution solutions are studied, but also a slight analysis of other alternatives that add value to the final solution, such as Slice architecture, SDM multiplexing and DSDM multiplexing.</i></p>	

CITA

*“Cuando creíamos que teníamos todas las respuestas,
de pronto, cambiaron todas las preguntas.”*

- Mario Benedetti

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi tutor, por su disponibilidad en todo momento y por guiarme en este proyecto.

Gracias a mis padres, por darme la oportunidad de formarme y ser quien soy hoy en día.

Gracias a mi compañera de viaje, por apoyarme en los momentos duros y levantarme el ánimo cuando más lo necesitaba.

Gracias a los compañeros con los que he realizado el máster, por ellos se ha hecho más ameno este camino.

RESUMEN

El proyecto se centra en analizar las diferencias entre la distribución de rejilla fija y la distribución de rejilla flexible dentro de las redes ópticas. La comparación nos arroja las ventajas de la rejilla flexible, argumentando así la evolución de las redes ópticas a redes ópticas elásticas.

Para realizar este análisis, se ha fijado un caso de uso, así como unos requerimientos básicos que ha de cumplir la solución, relativos a capacidad, eficiencia, escalabilidad y coste.

No solo se estudian las principales soluciones de distribución de rejilla, sino que se realiza un ligero análisis de otras alternativas que aportan valor a la solución final, como son la arquitectura Slice, la multiplexación SDM y la multiplexación DSDM.

ABSTRACT

The project focuses on analyzing the differences between fixed grid distribution and flexible grid distribution within optical networks. The comparison gives us the advantages of the flexible grid, arguing the evolution of optical networks to elastic optical networks.

To carry out this analysis, a use case has been established, as well as some basic requirements that the solution has to meet, regarding capacity, efficiency, scalability and cost.

Not only the main grid distribution solutions are studied, but also a slight analysis of other alternatives that add value to the final solution, such as Slice architecture, SDM multiplexing and DSDM multiplexing.

KEYWORDS

- FIXED GRID
- FLEXIBLE GRID
- ELASTIC OPTICAL NETWORK
- ROADM
- BVT
- SLICE ARCHITECTURE
- DENSE SPACE DIVISION MULTIPLEXING

ÍNDICE

1. Introducción	9
1.1 Formulación y justificación de la temática escogida	9
1.2 Estado del arte	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Plan de trabajo	11
1.4.1 Diagrama temporal alto nivel: Hitos	11
1.4.2 Diagrama temporal bajo nivel: Tareas	11
2. Escenario del caso de uso	14
2.1 Topología del caso de uso	14
2.2 Requerimientos del caso de uso	15
2.2.1 Capacidad	15
2.2.2 Eficiencia	15
2.2.3 Escalabilidad	16
2.2.4 Coste	16
3. Propuestas para el caso de uso	17
3.1 Rejilla fija	17
3.2 Rejilla flexible	18
3.3 Otras alternativas más novedosas	21
3.3.1 Arquitectura Slice	21
3.3.2 SDM	22
3.3.3 DSDM	22
4. Solución escogida para el caso de uso	24
5. Conclusiones generales	31
6. Líneas futuras	32
Bibliografía	33
Listado de acrónimos	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la demanda de tráfico	9
Figura 2. Diagrama temporal alto nivel: Hitos	11
Figura 3. Diagrama temporal bajo nivel: Tareas parte 1	12
Figura 4. Diagrama temporal bajo nivel: Tareas parte 2	12
Figura 5. Regiones sanitarias Cataluña	14
Figura 6. Comparación entre rejilla fija y rejilla flexible	19
Figura 7. Satisfacción de demandas en rejilla flexible con ROADM	20
Figura 8. BVT Sliceable suministrando varias demandas	22
Figura 9. Evolución cronológica de las capacidades ofrecidas	23
Figura 10. Constituciones de grupos multimodo y multinúcleo	23
Figura 11. Esquemático de la solución final	29
Figura 12. BSLR/4	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Asignación de frecuencias con rejilla fija según ITU-T G.694.1	18
Tabla 2. Mejora de eficiencia con EON	21
Tabla 3. Cálculo de la capacidad total de las 100 conexiones	26

1. Introducción

1.1 Formulación y justificación de la temática escogida

La temática escogida para el TFM es un análisis de las diferentes propuestas tecnológicas de redes ópticas que se le pueden ofrecer a una entidad o empresa privada. El proyecto se centrará en analizar las diferentes alternativas para obtener una solución tecnológica a un caso de uso plausible: solución unificada de interconexión de varias sedes de una misma entidad.

Se fijarán unos requisitos a cumplir en el caso de uso: Lo primero la topología de red, que deberá ser topología de anillo para conectar las diferentes sedes; y posteriormente se establecerán otros requerimientos importantes que debe satisfacer la solución, tales como la capacidad, la eficiencia, la escalabilidad y el coste de las diferentes soluciones.

Se analizarán las diferentes propuestas con el fin de discernir la mejor solución para el caso de uso fijado. Las propuestas a estudiar son la instalación de redes ópticas basadas en rejilla fija (fixed grid), redes ópticas elásticas basadas en rejilla flexible (flexible grid) y otras soluciones alternativas que mejoran la rejilla flexible en ciertos sentidos, como pueden ser la arquitectura Slice, la multiplexación SDM y la multiplexación DSDM.

1.2 Estado del arte

La exponencial demanda de tráfico por parte de los usuarios durante las últimas décadas hace que las redes tengan que evolucionar para poder ofrecer mayores capacidades. Esta demanda de tráfico no ha incrementado simplemente en usuarios particulares, también ha incrementado en empresas, gracias a factores como pueden ser el mayor uso del teletrabajo, la mayor utilización de las videollamadas, aplicaciones en servidores, mayores análisis de datos al evolucionar muchas compañías a empresas data-driven... etc.

Como indicador de este aumento se muestra a continuación el crecimiento que estima CISCO para el año 2023 en Europa [1]:

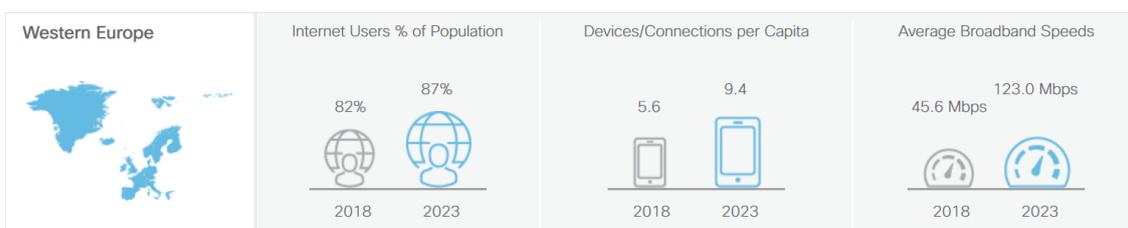


Figura 1. Evolución de la demanda de tráfico [1]

Actualmente hay entidades que tienen sus propias redes privadas de datos. Una de las soluciones comunes para interconectar todas las sedes de una misma entidad es

crear una red con topología de anillo. Estas implantaciones comúnmente se realizan mediante equipos de tecnología DWDM – cuya tecnología podemos consultar en la recomendación ITU-T G.671 [2] – con una distribución de espectro de rejilla fija – recomendación ITU-T G.694.1 Edition 1.0 [3] – para obtener capacidades dedicadas de 1 Gb/s, 10 Gb/s o 100 Gb/s. La red en anillo está formada por equipos DWDM, con funciones de transpondedor y de conmutador, haciendo que en cada una de las sedes pueda peinar o despeinar información, o transmitir en paso entre otras sedes.

Una asignación común de canales DWDM en rejilla fija en una operadora suele realizarse en función del número de enlaces que necesitemos para interconectar distintas redes. Se pueden utilizar 40 canales en la banda C con una rejilla de 100 GHz (0,8 nm) u 80 canales en la banda C con una rejilla de 50 GHz (0,4 nm). Normalmente se utilizan 80 canales, y se parte de la asignación de los 40 canales pares de la banda C, comprendidos entre 192,100 THz y 196,000 THz, y si se llenan, se utilizan los 40 canales impares de la misma banda, comprendidos entre 192,150 THz y 196,050 THz. El máximo de canales que tenemos, y condicionados a capacidad, es de 80 canales.

Dependiendo de la cantidad de enlaces, también es posible encontrarnos con la utilización de tecnología CWDM – tecnología que también podemos consultar en la recomendación ITU-T G.671 [2] – en la cual se utilizan 8 canales comprendidos entre 1471 nm y 1611 nm, con una rejilla de 20 nm (2.500 GHz). Apto para capacidades máximas de 10 Gbps. La distribución de canales para CWDM queda definida en la recomendación ITU-T G.694.2 [4].

La asignación de longitudes de onda de DWDM y CWDM suele ser fija, lo que se conoce como rejilla fija. Menos común es la utilización de una rejilla flexible, al ser más novedosa y al requerir más costes. La distribución de rejilla flexible para DWDM queda definida en una segunda edición de la ITU-T G.694.1 [5]. Para ciertos escenarios es muy ventajosa, pues aporta beneficios como capacidades por encima de 100 Gb/s, anchos de bandas ajustados a la demanda y mejores eficiencias al posibilitar así el uso de modulaciones adaptativas.

Aparecen otras alternativas en estudio que se pueden implementar aparte de la rejilla fija y la rejilla flexible, como son la arquitectura Slice [6] – recomendación ITU-T Y.3112 [7] – , la multiplexación SDM [8] o la multiplexación DSDM [9].

1.3 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es realizar una comparativa de las redes ópticas de rejilla fija, en inglés denominadas fixed grid, y las redes ópticas de rejilla flexible en inglés denominadas flexible grid. Para ello nos basaremos en un caso de uso que nos facilitará dar forma al proyecto.

Dicho caso de uso será un escenario común de despliegue de red óptica y en él se definirán unos requisitos que han de cumplir las diversas soluciones a implantar. Uno de los objetivos es decidir los requisitos fundamentales que se han de cumplir. En este caso los requisitos marcados son topología, capacidad, eficiencia, escalabilidad y coste.

Dentro de las posibles soluciones que podamos dar al problema, nos centraremos en analizar las dos siguientes: redes ópticas de rejilla fija y redes ópticas de rejilla flexible.

Aparte se analizarán de forma menos detallada otras soluciones más novedosas que podemos aportar, como son la tecnología Slice, la multiplexación SDM o multiplexación DSDM.

Una vez definido el caso de uso, los requisitos y analizadas las diferentes propuestas, se dará la solución más ajustada al caso de uso. Se cerrará el proyecto con conclusiones generales relativas a lo analizado y con una mención a las posibles líneas futuras de análisis.

1.4 Plan de trabajo

El plan de trabajo se mostrará en dos niveles, uno con los hitos más relevantes del proyecto y otro con un diagrama más detallado de las tareas seguidas para la realización de este.

1.4.1 Diagrama temporal alto nivel: Hitos

Se muestra el diagrama temporal de los principales hitos del proyecto:



Figura 2. Diagrama temporal alto nivel: Hitos

1.4.2 Diagrama temporal bajo nivel: Tareas

Con vistas a realizar un análisis a bajo nivel del plan de trabajo, analizamos las tareas del proyecto.

Para el diagrama de tareas, se muestra primero el número del hito al que corresponde la tarea y posteriormente la descripción de la tarea. El diagrama de tareas es el siguiente:

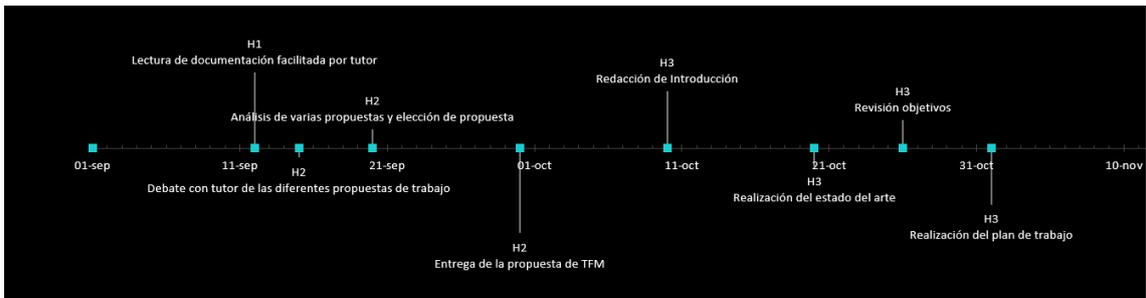


Figura 3. Diagrama temporal bajo nivel: Tareas parte 1

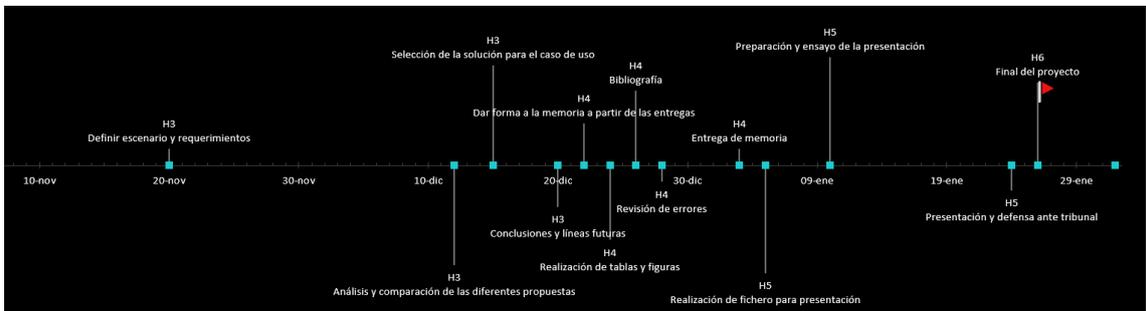


Figura 4. Diagrama temporal bajo nivel: Tareas parte 2

A continuación, se describen todas las tareas del diagrama:

- ➔ Lectura de documentación facilitada por tutor: Tarea perteneciente a hito 1. Lectura de los artículos de IEEE facilitados por el tutor para la adquisición de conocimientos con vistas a la realización del proyecto.
- ➔ Debate con tutor de las diferentes propuestas de trabajo: Tarea perteneciente a hito 2. Debate acerca de los posibles proyectos que se podrían llevar a cabo.
- ➔ Análisis de varias propuestas y elección de propuesta: Tarea perteneciente a hito 2. Elección de la base del proyecto.
- ➔ Entrega de la propuesta de TFM: Tarea perteneciente a hito 2. Realización de propuesta formal del proyecto.
- ➔ Redacción de Introducción: Tarea perteneciente a hito 3. Realización de la introducción del proyecto y los objetivos principales.
- ➔ Realización del estado del arte: Tarea perteneciente a hito 3. Realización del contexto del proyecto.
- ➔ Revisión objetivos: Tarea perteneciente a hito 3. Revisión de objetivos en función del desarrollo del proyecto.
- ➔ Realización del plan de trabajo: Tarea perteneciente a hito 3. Estudio de un plan de trabajo para la realización del proyecto.

- Definir escenario y requerimientos: Tarea perteneciente a hito 3. Definición de un caso de uso y unos requerimientos en los que basarnos para la realización del proyecto.
- Análisis y comparación de las diferentes propuestas: Tarea perteneciente a hito 3. Estudio en detalle de todas las propuestas, tanto las principales como las alternativas.
- Selección de la solución para el caso de uso: Tarea perteneciente a hito 3. En función a los requerimientos, elección de la mejor solución posible.
- Conclusiones y líneas futuras: Tarea perteneciente a hito 3. Principales observaciones tras el proyecto y posibles proyectos futuros.
- Dar forma a la memoria a partir de las entregas: Tarea perteneciente a hito 4. Realización del documento final de entrega del proyecto.
- Realización de tablas y figuras: Tarea perteneciente a hito 4. Revisar las tablas y figuras del proyecto. Añadir índice de tablas y figuras.
- Bibliografía: Tarea perteneciente a hito 4. Juntar los documentos en los que está basado el proyecto, finalizar bibliografía y corregir citaciones a bibliografía.
- Revisión de errores: Tarea perteneciente a hito 4. Revisión de posibles errores de la memoria.
- Entrega de memoria: Tarea perteneciente a hito 4. Entregar la memoria.
- Realización de fichero para presentación: Tarea perteneciente a hito 5. Realización del fichero .pptx para la presentación ante el tribunal.
- Preparación y ensayo de la presentación: Tarea perteneciente a hito 5. Ensayo de la presentación.
- Presentación y defensa ante tribunal: Tarea perteneciente a hito 5. Defensa del proyecto.
- Final del proyecto: Tarea perteneciente a hito 6. Final del proyecto.

2. Escenario del caso de uso

Para poner en contexto el escenario a plantear, se va a suponer una posible oportunidad de negocio que puede surgir para definir un tipo de red como la que queremos fijar.

Supongamos que el consejero de sanidad de una comunidad autónoma quiere conectar sus principales hospitales en una única red privada. Puede haber diversas razones que podemos suponer por las que se quiera este tipo de solución: para hacer videollamadas entre ellos porque quiere que haya supervisión de más de un cirujano de las operaciones de cirugía más relevantes; para compartir resultados de laboratorio entre los diferentes hospitales; para grabar conferencias en las salas de comunicación y guardar en repositorios locales...etc.

Por ejemplo, Cataluña tiene 72 hospitales de utilización pública [10] divididos por todo su territorio y el Departamento de Salud de la Generalitat de Catalunya requiere conectar los 30 más importantes. Tendríamos que instalar una red entre los 30 hospitales y aparte tener en cuenta que un hospital puede tener varias conexiones con el resto de los hospitales. En este caso tendríamos 30 sedes de cliente, distanciadas entre sí unos 40-80 km y con unas provisiones de capacidad diferentes para las diversas necesidades. Todas las regiones sanitarias tendrán al menos un hospital perteneciente al anillo.



Figura 5. Regiones sanitarias Cataluña [11]

2.1 Topología del caso de uso

La topología que necesitaría el caso de uso fijado sería una red de anillo con 30 nodos de acceso. Cada uno de los 30 nodos, en este caso hospitales, estaría conectado a otros dos hospitales, de modo que todos quedarían unidos en una topología de anillo.

Esta topología nos permite interconectar todos los hospitales con la capacidad de librar grandes distancias, ya que el enlace de mayor longitud no unirá un hospital de Gerona con uno de Tarragona (casi 200km), sino que serán enlaces de entre 40 y 80 km, en el peor de los casos.

La definición de esta topología es importante, ya que, en cada enlace aparte de poder peinar, despeinar o dejar en paso la información, se regenerará la señal con amplificadores, lo cual nos ayudará a mejorar los niveles de OSNR.

2.2 Requerimientos del caso de uso

Aparte de la topología de red y el número de sedes a conectar, es oportuno fijar otros requisitos al caso de uso a analizar.

2.2.1 Capacidad

Es necesario recalcar que las necesidades de capacidad de red son entre hospitales. De este modo las conexiones que se definirán serán las siguientes:

- Enlaces de 1 Gb/s para servicios de transferencia de datos entre hospitales.
- Enlaces de 10 Gb/s para servicios de videoconferencias en alta definición y repositorio en servidores locales.
- Enlaces de 100 Gb/s y 400 Gb/s para servicios de tele-cirugía o cirugía asistida.

Aparte de las capacidades, se requerirá un número mínimo de conexiones. Si en un mismo momento tuviéramos que conectar cada uno de los hospitales con los otros 29 hospitales, el número de conexiones totales en el mismo momento serían:

$$29 \frac{\text{conexiones}}{\text{hospital}} * 30 \text{ hospitales} = 870 \text{ conexiones}$$

Se marca que como requisito mínimo que el anillo tiene que trabajar con un take rate del 11 %, de tal modo que en un mismo momento cada hospital pueda tener conexión con otros 3 hospitales – 90 conexiones –.

Según el take rate marcado como requisito, el anillo debería de soportar un mínimo de:

$$870 * 0.11 = 96 \text{ conexiones}$$

Para redondear, supondremos un mínimo de 100 conexiones como requisito.

2.2.2 Eficiencia

Es necesario tener en cuenta este factor en la elección de la solución final. Las diferentes soluciones que se puedan aportar tendrán mejor o peor eficiencia en cuanto a:

- Aprovechamiento del espectro: Cómo dividir el espectro.
- Aprovechamiento del ancho de banda: Adaptación de modulaciones según capacidades y distancias.

2.2.3 Escalabilidad

A la hora de definirse por una solución, es importante tener una previsión a medio-largo plazo para prevenir futuras demandas o adaptación a nuevas necesidades.

Hay que tener en cuenta que en nuestro caso de uso tenemos 30 sedes, pero igual dentro de 10-15 años se presenta como necesidad aumentar el número de hospitales conectados a 50. Se ha de tener en cuenta la escalabilidad de la solución para esta adaptación de la estructura de red.

Otra casuística que se ha de valorar es el crecimiento vegetativo de número de enlaces, así como de sus capacidades. La red ha de tener unos márgenes de aumento de capacidad de red para el crecimiento de demanda, así como la suficiente facilidad para aumentar el número de enlaces de la red. Suponemos como requisito de escalabilidad un aumento de enlaces de 1 a 10 Gb/s, y de 10 Gb/s a 100Gb/s, así como el número de conexiones que pasaría de 100 a 150 – take rate pasaría de 11 % a 18% –.

2.2.4 Coste

Aunque no se vaya a fijar como límite un umbral de presupuesto, se ha de tener en cuenta que la solución escogida en función del resto de requerimientos no sea mucho más cara en relación calidad-coste que el resto de las soluciones.

3. Propuestas para el caso de uso

A continuación, analizaremos las diferentes propuestas tecnológicas que podemos encontrar.

3.1 Rejilla fija

Como su nombre indica, la principal característica de la rejilla fija es que el espectro lo dividiremos en rejillas de ancho de banda fijo. El tamaño de la rejilla puede ir desde los 12.5 GHz a los 100 GHz, siendo la rejilla de 50 GHz la distribución más común.

En la recomendación ITU-T G.694.1 [3] podemos consultar las diferentes asignaciones de canales que podemos realizar de la rejilla de frecuencias para aplicaciones DWDM.

Para ilustrar la asignación que se realiza en la banda C (1530 nm - 1555 nm), se muestra a continuación las frecuencias centrales nominales teóricas, dadas en la recomendación, para los diferentes tamaños de rejilla:

Nominal central frequencies (THz) for spacings of:				Approximate nominal central wavelengths (nm) (Note)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz and above	
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
195.9375	–	–	–	1530.0413
195.9250	195.925	–	–	1530.1389
195.9125	–	–	–	1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341
195.8875	–	–	–	1530.4318
195.8750	195.875	–	–	1530.5295
195.8625	–	–	–	1530.6271
195.8500	195.850	195.85	–	1530.7248
195.8375	–	–	–	1530.8225
195.8250	195.825	–	–	1530.9203
195.8125	–	–	–	1531.0180
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.1157
195.7875	–	–	–	1531.2135
195.7750	195.775	–	–	1531.3112
195.7625	–	–	–	1531.4090
195.7500	195.750	195.75	–	1531.5068
195.7375	–	–	–	1531.6046
195.7250	195.725	–	–	1531.7024
195.7125	–	–	–	1531.8003
195.7000	195.700	195.70	195.7	1531.8981
195.6875	–	–	–	1531.9960
195.6750	195.675	–	–	1532.0938
195.6625	–	–	–	1532.1917
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*

193.2375	-	-	-	1551.4197
193.2250	193.225	-	-	1551.5200
193.2125	-	-	-	1551.6204
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.7208
193.1875	-	-	-	1551.8212
193.1750	193.175	-	-	1551.9216
193.1625	-	-	-	1552.0220
193.1500	193.150	193.15	-	1552.1225
193.1375	-	-	-	1552.2229
193.1250	193.125	-	-	1552.3234
193.1125	-	-	-	1552.4239
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.5244
193.0875	-	-	-	1552.6249
193.0750	193.075	-	-	1552.7254
193.0625	-	-	-	1552.8259
193.0500	193.050	193.05	-	1552.9265
193.0375	-	-	-	1553.0270
193.0250	193.025	-	-	1553.1276
193.0125	-	-	-	1553.2282
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.3288
192.9875	-	-	-	1553.4294
192.9750	192.975	-	-	1553.5300
192.9625	-	-	-	1553.6307
.
.
.

Tabla 1. Asignación de frecuencias con rejilla fija según ITU-T G.694.1 [3]

Las frecuencias nominales centrales de los canales quedarían regidas por la siguiente fórmula, en la que se relaciona la frecuencia de referencia (193.1 THz) y la separación entre canales:

$$193.1 \text{ (THz)} + n * \text{tamaño rejilla (THz)}$$

Donde “n” es un entero positivo, negativo o incluso 0, y el tamaño de la rejilla puede ser 0.0125, 0.025, 0.05 o 0.1 THz.

Si tuviéramos que asignar diferentes tamaños de rejilla hay que tener en cuenta que por cada 100 GHz quemamos 8 canales de 12.5 GHz, 4 de 25 GHz y 2 de 50 GHz.

Mediante la rejilla fija tendríamos una asignación invariable del espectro entre los transceptores de origen y destino para satisfacer las necesidades demandadas.

3.2 Rejilla flexible

De forma análoga al análisis de la rejilla fija, analizamos la asignación de canales en rejilla flexible. Para ello tomamos los datos de la segunda edición de la recomendación ITU-T G.694.1 [5].

Las frecuencias nominales centrales de los canales quedarían regidas por la siguiente fórmula:

$$193.1 \text{ (THz)} + n * 0.00625 \text{ (THz)}$$

Donde “n” es un entero positivo, negativo o incluso 0.

La asignación de frecuencias centrales en este caso es más fina ya que la separación entre canales se reduce de 0.0125 THz, que teníamos en rejilla fija, a 0.00625 THz que tenemos en rejilla flexible.

Además de la asignación de frecuencias centrales, las únicas limitaciones son que el canal como mínimo sea de 12.5 GHz y que cualquier combinación de frecuencias está permitida mientras dos canales no se superpongan.

Dejando de lado la asignación de canales relativa a la ITU-T G.694.1, la IEEE – en el artículo “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?” [12] – realiza un análisis detallado de las novedades que nos trae la rejilla flexible.

Las principales razones de la aparición de la rejilla flexible son las siguientes:

- ➔ La redistribución del espectro mediante rejilla flexible nace de la necesidad de adaptarse a demandas futuras por encima de los 100 Gb/s, dicha necesidad no puede ser cubierta por el reparto de espectro de rejilla fija.

En la figura 5, tomada del artículo citado [12], podemos observar en la parte superior la distribución de rejilla fija y en la parte inferior la distribución de rejilla flexible. Se puede apreciar el mejor aprovechamiento del espectro con la rejilla flexible.

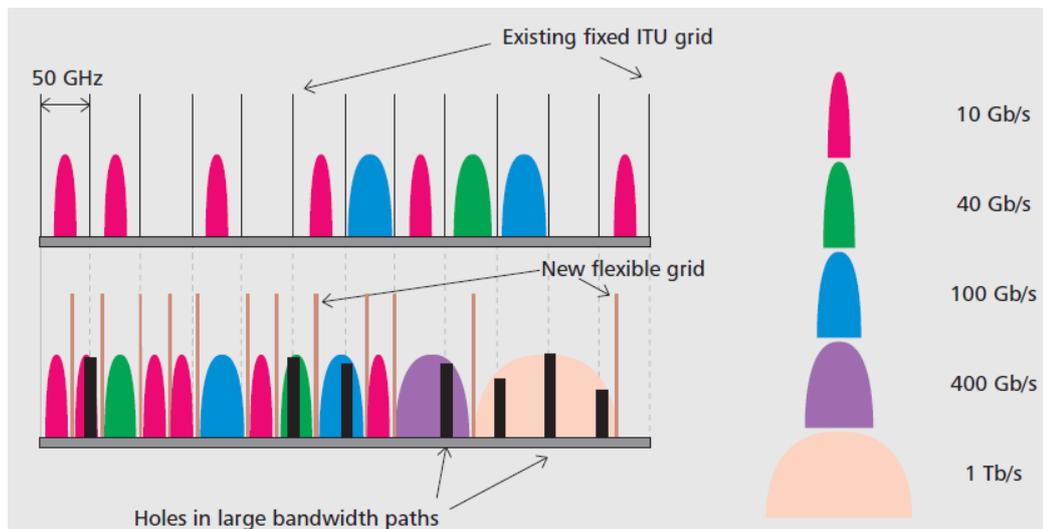


Figura 6. Comparación entre rejilla fija y rejilla flexible [12]

La rejilla flexible ofrece capacidades por encima de los 100 Gb/s, ofreciendo anchos de banda de 400 Gb/s y 1Tb/s como aparece en la ilustración, pero siendo factibles otros anchos de banda, como por ejemplo de 200 Gb/s mediante la técnica de multiplexación inversa juntando dos canales de 100 Gb/s.

- ➔ Otra demanda principal que se intenta cubrir mediante la rejilla flexible es una adaptabilidad a la demanda de los usuarios, de modo que la red pueda adaptarse a proporcionar anchos de banda flexibles mediante esta solución.

Partiendo de que la rejilla flexible se sustentaría sobre la misma tecnología que las de rejilla fija, solo se necesitaría añadir unos transceptores y elementos de red flexibles, así como unos nodos inteligentes de red. Apareciendo así un nuevo paradigma en las redes ópticas: EON (Elastic Optical Networking).

La definición de red óptica elástica está basada en que el espectro puede ser dividido y que mediante transceptores de ancho de banda variable (BVT) y ROADMs (Reconfigurable Optical Add- Drop Multiplexer) se puedan generar EOPs (Elastic Optical Paths) con demandas de diferentes capacidades. En la figura 6, tomada del artículo de la IEEE [12], podemos ver un ejemplo de 3 demandas de capacidades diferentes entregada a 3 nodos diferentes mediante ROADMs.

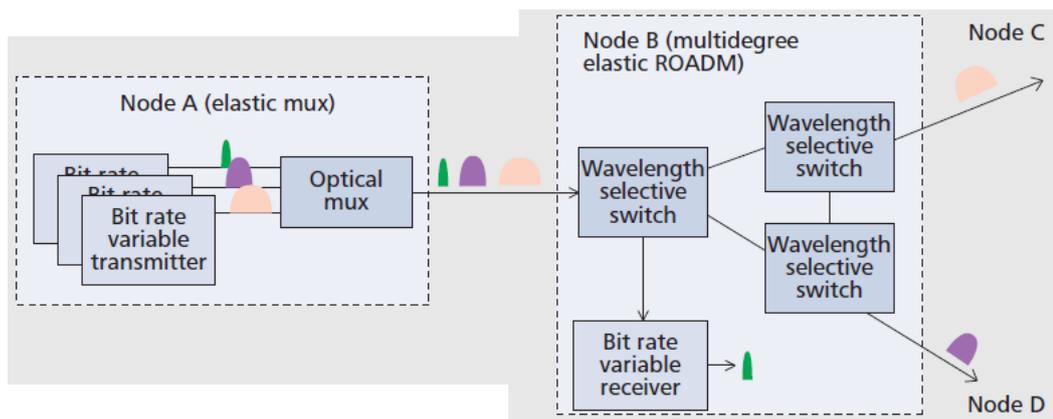


Figura 7. Satisfacción de demandas en rejilla flexible con ROADM [12]

- ➔ Mediante la detección coherente de señales se permite un espaciado entre canales menor que con rejilla fija, respetando siempre que se cumpla Nyquist para que no tengamos superposición de señales. Gracias a esto, y a la utilización de modulaciones adaptativas según los diferentes EOPs, obtenemos una mejor eficiencia en comparación con la rejilla fija.

A continuación, se muestra en la tabla 2 [12], las mejoras de eficiencia, de la rejilla flexible con respecto a la rejilla fija, por modulación y ancho de banda demandado.

Demand bit rate (Gb/s)	Modulation format	Channel bandwidth (GHz)	Fixed grid solution	Efficiency increase for EON
40	DP-QPSK	25+10	1 50 GHz channel	35 GHz vs. 50 = 43%
100	DP-QPSK	37.5+10	1 50 GHz channel	47.5 GHz vs. 50 = 5%
100	DP-16QAM	25+10	1 50 GHz channel	35 GHz vs. 50 = 43%
400	DP-QPSK	75+10	4 100 Gb/s in 4 50 GHz channels	85 GHz vs. 200 = 135%
400	DP-16QAM	75+10	2 200Gb/s in 2 50 GHz channels	85 GHz vs. 100 = 17%
1000	DP-QPSK	190+10	10 100G in 10 50 GHz channels	200 GHz vs. 500 = 150%
1000	DP-16QAM	190+10	5 200Gb/s in 5 50 GHz channels	200 GHz vs. 250 = 25%

Tabla 2. Mejora de eficiencia con EON [12]

Se ven mejoras de eficiencia de 150% y 135% para demandas de 400 Gb/s y 1 Tb/s con modulación DP-QPSK. Para demandas de 100 Gb/s y 40 Gb/s las mejoras de eficiencia no son tan superiores, llegando a 43 % en el mejor de los casos.

3.3 Otras alternativas más novedosas

Las soluciones analizadas hasta el momento son la distribución del espectro mediante rejilla fija y mediante rejilla flexible. La rejilla fija, seguramente sea la solución más común en redes privadas, en gran medida a que es comercialmente más madura que la distribución de rejilla flexible. La distribución mediante rejilla flexible ha sido comercializada los últimos años mediante las operadoras a las compañías privadas y es la solución más novedosa comercializada hasta el momento.

A continuación, analizaremos soluciones más novedosas que pueden llegar a ser beneficiosas dependiendo del caso de uso.

3.3.1 Arquitectura Slice

Esta solución viene de la mano de la distribución mediante rejilla flexible. El concepto slice nace de hacer rebanadas de la arquitectura existente [6]. En este caso, el slice es la creación de un BVT virtual a partir de diferentes BVT, de modo que tendríamos un BVT que podría ser entendido como varios BVTs y cada uno de ellos podría facilitar los recursos demandados para cada EOP.

Se podría optimizar el uso de la rejilla flexible ya que si tenemos un BVT que puede ofrecer 400 Gb/s y facilita una demanda de 100 Gb/s, tenemos otros 300 Gb/s que estamos infrutilizando. Si fuera sliceable podríamos utilizar esos 300 Gb/s para satisfacer otras demandas mediante nuevos EOPs.

El documento de la IEEE anteriormente citado [12], nos muestra un ejemplo claro de como un BVT de 400 Gb/s podemos hacerlo sliceable y sacar 3 EOPs (uno de 200 Gb/s y 2 de 100 Gb/s):

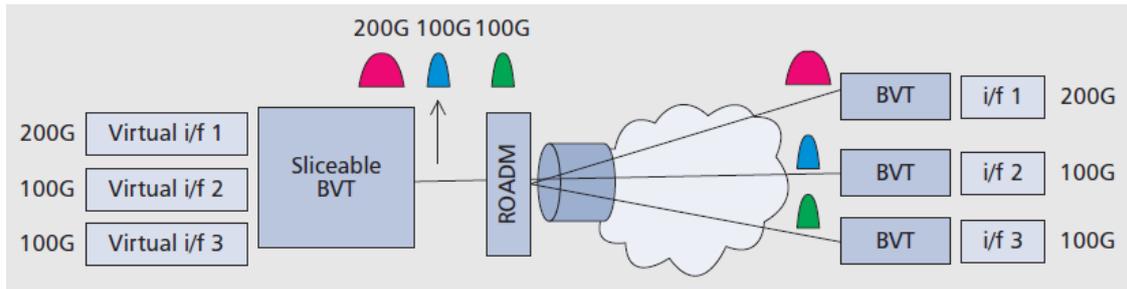


Figura 8. BVT Sliceable suministrando varias demandas [12]

Los nuevos BVT comercializados ofrecen esta funcionalidad con la que se podrán crear varios EOPs por BVT, y además cada EOP puede ofrecer la modulación más eficiente para cada demanda.

3.3.2 SDM

La tecnología utilizada para rejilla fija y para rejilla flexible es DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), mediante la cual, por cada fibra monomodo (tercera ventana) y mononúcleo, podemos obtener hasta 80 canales utilizando multiplexación por longitud de onda.

Aplicando a esta tecnología multiplexación por división de espacio, mediante la utilización de varios modos por cada longitud de onda, podríamos conseguir mayores capacidades en nuestra red.

Según podemos ver en el artículo “On the Benefits of Few-Mode Transmission in Ring Metro Optical Networks with Flexible Grid” [8], la capacidad sería multiplicada por el número de modos utilizados. Si bien es cierto que se debe de llegar a una solución de compromiso con el número de modos utilizados, ya que cuantos más modos utilizemos aumenta la complejidad de la transmisión.

3.3.3 DSDM

Si se necesitara de mayor capacidad en las soluciones anteriores, hay una solución emergente que contribuiría a ofrecer mayor capacidad por cada fibra, la tecnología DSDM (Dense Space Division Multiplexion). Mediante SDM ya podíamos obtener mayores capacidades, pero el paso siguiente es realizar esa división más pequeña, esto se realiza mediante DSDM.

A continuación, se muestra la evolución de las diferentes apariciones tecnológicas y de capacidad mediante el gráfico mostrado en el artículo de la IEEE “Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber” [9].

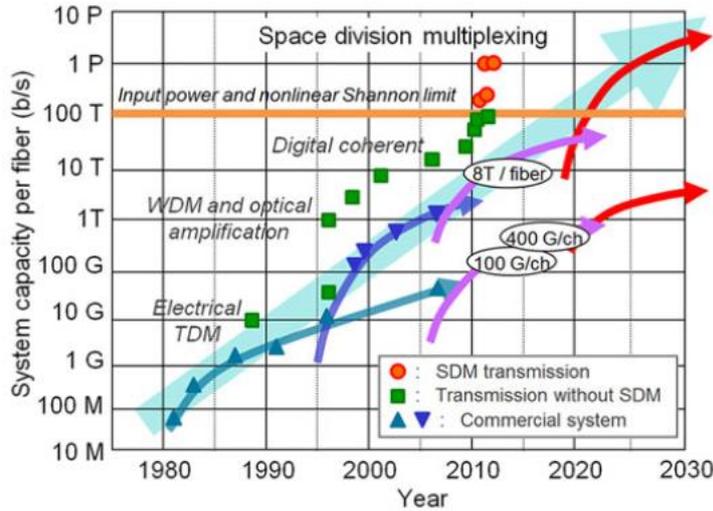


Figura 9. Evolución cronológica de las capacidades ofrecidas [9]

Esta solución se basa en la utilización de fibras multi modo y multi núcleo de tal forma que partiendo de los 100 Tb/s que podríamos obtener sin utilización de multiplexación por espacio, aumentemos la capacidad teórica por fibra hasta obtener 1 Pb/s.

A continuación, se muestran diversas constituciones de grupos multimodo y multinúcleo [9].

	Single-mode core		Multi-mode core
	I Uncoupled Single-mode	II Coupled Super-mode	III Multimode Multi-mode
A Multiple spatial channel groups	<p>Multi-core</p> <p>7 core [8, 11, 12] 12 core [6] 19 core [13]</p>	<p>Coupled-core group</p> <p>3 core x 3 group [22]</p>	<p>Multi-core Multi-mode</p> <p>12 core x 3 mode [14, 31]</p>
B Single spatial channel group	<p>Conventional single-mode</p>	<p>Coupled-core</p> <p>6 core x 1 group [21]</p>	<p>Multi-mode</p> <p>Few-mode / multi-mode [10, 23-27, 29]</p>

Figura 10. Constituciones de grupos multimodo y multinúcleo [9]

4 Solución escogida para el caso de uso

Según el análisis anteriormente realizado de las dos principales propuestas, la rejilla fija y la rejilla flexible, podemos considerar que la rejilla fija no sería la solución acertada para este caso de uso. Para ello, se justifica en base a los requerimientos planteados que la solución idónea es la distribución de rejilla flexible:

- **Capacidad:** Se nos requieren capacidades por encima de los 100 Gb/s, lo cual no es muy viable con rejilla fija a no ser que utilicemos superchannels. Además, obtendremos mayores capacidades totales en los enlaces con rejilla flexible. Realizamos una comparación numérica para demostrar esto:

En ambas distribuciones, se asignarían canales en tercera ventana en banda C (192 a 196 THz). Tenemos un ancho de banda para la asignación de canales de:

$$196 \text{ THz} - 192 \text{ THz} = 4 \text{ THz}$$

- Para rejilla fija tenemos que el mayor número de canales utilizados para DWDM los obtenemos con una rejilla de 50 GHz. Obtendríamos un total de:

$$\frac{4 \text{ THz}}{50 \text{ GHz}} = 80 \text{ canales}$$

Fijándonos en los datos de la tabla 2, donde se realiza una comparación de eficiencias entre rejilla fija y rejilla flexible, vemos que la capacidad máxima que podemos obtener con una rejilla fija de 50 GHz son 100 Gbps.

Definiendo el enlace por la unión de un hospital con otro contiguo, en rejilla fija podemos obtener con 80 canales una capacidad de enlace de:

$$80 \text{ canales} * 100 \text{ Gb/s} = 8 \text{ Tb/s}$$

Como en la solución se crea un anillo de 30 hospitales, en el cual desde un hospital a otro podemos acceder por dos caminos, uno en sentido horario y otro en sentido antihorario, podríamos tener una capacidad total máxima de:

$$8 \text{ Tb/s} * 2 = 16 \text{ Tb/s}$$

- Para la rejilla flexible, de los 4 THz habría que quitar el ancho banda de guarda (6,25 GHz). Si utilizamos los 80 canales del DWDM tendremos por tanto un ancho de banda para información libre de guardas de:

$$4 \text{ THz} - (80 \text{ canales} * 6,25 \text{ GHz}) = 3,5 \text{ THz}$$

No sería el mismo ancho de banda para información si tuviéramos que asignar solo 20 canales. Tendríamos mayor ancho de banda para cada canal ya que solo tenemos 20 guardas:

$$4 \text{ THz} - (20 \text{ canales} \times 6,25 \text{ GHz}) = 3,875 \text{ THz}$$

Para utilizar estas dos distribuciones de canales, vamos a utilizar el número mínimo de enlaces fijado en los requisitos, 100 enlaces. Para ello vamos a suponer que de los 30 hospitales que vamos a conectar, en un momento dado, 10 de ellos realizan una conexión con otros 10 hospitales, tenemos por tanto un total de 100 conexiones que tienen que autoasignarse de forma flexible dentro de nuestro anillo.

Una forma de fácil asignación sería realizar 80 conexiones en el sentido horario del anillo y otras 20 conexiones en el sentido antihorario del anillo. De esa forma tendríamos las siguientes capacidades medias por conexión:

$$\text{sentido 1 (horario): } \frac{3,5 \text{ THz}}{80 \text{ conexiones}} = 43,75 \text{ GHz/conexión}$$

$$\begin{aligned} \text{sentido 2 (antihorario): } \frac{4 \text{ THz} - (20 \times 6,25 \text{ GHz})}{20 \text{ conexiones}} &= \frac{3,875 \text{ THz}}{20 \text{ conexiones}} = \\ &= 193,75 \text{ GHz/conexión} \end{aligned}$$

Estas son los anchos de banda medios por canal, aunque como es sabido la asignación del ancho de banda del canal es flexible y tendremos diversas demandas desde varios hospitales simultáneamente en cada momento.

A partir de los datos de la tabla 2, donde se aparecían las modulaciones utilizadas por demanda y eficiencias de rejilla flexible, realizamos una combinación de las 100 conexiones del ejemplo para intentar alcanzar la máxima capacidad posible.

Para ello nos hemos centrado en las modulaciones con mejor eficiencia. Se muestra la combinación de conexiones en la tabla 3.

Demanda (Gbps)	Ancho de banda (GHz)	Modulación	Mejora de Eficiencia (%)	Eficiencia	Conexiones S1	Conexiones S2	Ancho banda S1 (GHz)	Ancho banda S2 (GHz)	Capacidad Total S1 (Gbps)	Capacidad Total S2 (Gbps)
40	35	DP-QPSK	43	Buena						
100	47,5	DP-QPSK	5	Descartada						
100	35	DP-16QAM	43	Buena	66	1	2310	35	6600	100
400	85	DP-QPSK	135	Muy Buena	14		1190		5600	
400	85	DP-16QAM	17	Descartada						
1000	200	DP-QPSK	150	Muy Buena		19		3800		19000
1000	200	DP-16QAM	25	Descartada						
					80	20	3500	3835	12200	19100
					=80 conexiones	=20 conexiones	<= 3,5 THz Sentido 1	<= 3,875 THz Sentido 2	12,2 Tbps Sentido 1	19,1 Tbps Sentido 2

Tabla 3. Cálculo de la capacidad total de las 100 conexiones

Para el sentido 1, en el cual teníamos 80 conexiones, se crean 66 conexiones de 100 Gb/s con modulación DP-16QAM y 14 conexiones de 400 Gb/s con modulación DP-QPSK. Por ancho de banda cumplimos no superar los 3,5 THz que teníamos para el sentido 1. Obtendríamos con estas 80 conexiones una capacidad total de 12,2 Tb/s.

Para el sentido 2, en el cual teníamos 20 conexiones, se crean 19 conexiones de 1 Tb/s con modulación DP-QPSK y 1 conexión de 100 Gb/s con modulación DP-16QAM. Por ancho de banda cumplimos no superar los 3,875 THz que teníamos para el sentido 2, ya que ocuparíamos 3,835 THz. Obtendríamos con estas 20 conexiones una capacidad total de 19,1 Tb/s.

Sumando las capacidades que obtendríamos con el sentido horario (sentido 1) y el sentido antihorario (sentido 2), obtendríamos una capacidad total para este ejemplo de:

$$12,2 \text{ Tb/s} + 19,1 \text{ Tb/s} = 31,3 \text{ Tb/s}$$

Si realizamos una comparación para el mismo número de conexiones que en el ejemplo de rejilla fija, sería realizar 80 conexiones en el sentido horario y otras 80 conexiones en el sentido antihorario. Lo que nos daría una capacidad total con rejilla flexible de:

$$12,2 \text{ Tb/s} * 2 = 24,4 \text{ Tb/s}$$

Por tanto, queda demostrado que con ambas distribuciones podemos superar el número de conexiones mínimas marcadas en los requisitos, 100 conexiones. De hecho, se ha estudiado la asignación de 160 conexiones para ambos casos, lo cual también superaría el crecimiento de enlaces marcado en el requisito de escalabilidad.

Con el análisis realizado para 160 conexiones – lo que sería un 18,4 % de take rate – vemos que, para un mismo número de conexiones, obtenemos mayor capacidad en la rejilla flexible que en la rejilla fija, ya que, para el mismo caso, tenemos 24,4 Tb/s en rejilla flexible contra los 16 Tb/s en rejilla fija.

La limitación por capacidad en la rejilla flexible serían las 80 conexiones por enlace heredadas del DWDM y un ancho de banda de asignación de 3,5 THz por cada sentido. Este ancho de banda es el más limitante ya que a mayor número de conexiones, mayor número de guardas y por ende menos ancho de banda libre para información.

- ➔ **Eficiencia:** Según hemos visto en las comparativas de la IEEE, la rejilla flexible ofrece mejores eficiencias por el uso de modulaciones adaptativas y una mejor distribución de espectro. Claramente es más eficiente la rejilla flexible que la rejilla fija.
- ➔ **Escalabilidad:** La escalabilidad no es el fuerte de la rejilla fija, ya que se realiza una asignación fija del espectro. Si acabamos con las facilidades de longitudes de onda, solo es posible ampliar la capacidad mediante ampliación de tarjetas o equipos. Sin embargo, la rejilla flexible ofrece adaptabilidad según

los recursos demandados por el usuario, así como reasignaciones de espectro más flexibles.

Si fuera necesario aumentar el número de hospitales, para todas las soluciones posibles, consistiría en añadir los nuevos hospitales al anillo existente. Respecto al crecimiento vegetativo del número de enlaces, ambas soluciones presentan sus límites, pero presenta más facilidades una redistribución con rejilla flexible que una redistribución de rejilla fija.

- **Coste:** El precio de los equipos para asignación de rejilla fija es menor que los equipos de rejilla flexible por dos motivos: el primero de ellos es por la menor complejidad de los equipos; y el segundo, porque llevan más tiempo en el mercado. Sin embargo, los equipos de rejilla flexible ya llevan unos años siendo demandados en el mercado, lo cual hace que poco a poco sea un producto más maduro y con más competencia entre suministradores, lo que llevará a un acercamiento del coste con los equipos de rejilla fija. Es importante remarcar que, aunque sea más costosa una solución de rejilla flexible, nos aporta muchas mejoras con respecto a la solución de rejilla fija.

Tras estas consideraciones, se cree conveniente que la principal solución escogida sea la distribución de rejilla flexible. Además, a esta solución la podemos añadir alguna de las mejoras estudiadas como alternativas.

Las alternativas por multiplexación por división en espacio bien sean por utilización de multimodo (SDM), o por multimodo y multinúcleo (DSDM), las podemos considerar como soluciones poco maduras comercialmente por lo que podemos descartarlas. La mayoría de las estructuras de anillo privadas que se montan en la actualidad se realizan mediante fibras mononúcleo y monomodo. Aparte de la madurez, el coste de estas soluciones sería mayor con todos los km que tenemos que cubrir a lo largo de la comunidad.

La alternativa de la arquitectura Slice sí que es interesante ya que los BVT que se comercializan se venden con funcionalidades sliceables, como la familia GX de Infinera [13]. Aporta gran valor el hecho de que un solo BVT pueda dar recursos a varios EOPs.

La solución global escogida sería una red en estructura de anillo que conectaría los 30 hospitales utilizando tecnología DWDM con distribución de rejilla flexible. En cada uno de los hospitales se instalará un BVT sliceable y un ROADM.

A continuación, se muestra una ilustración de la solución final:

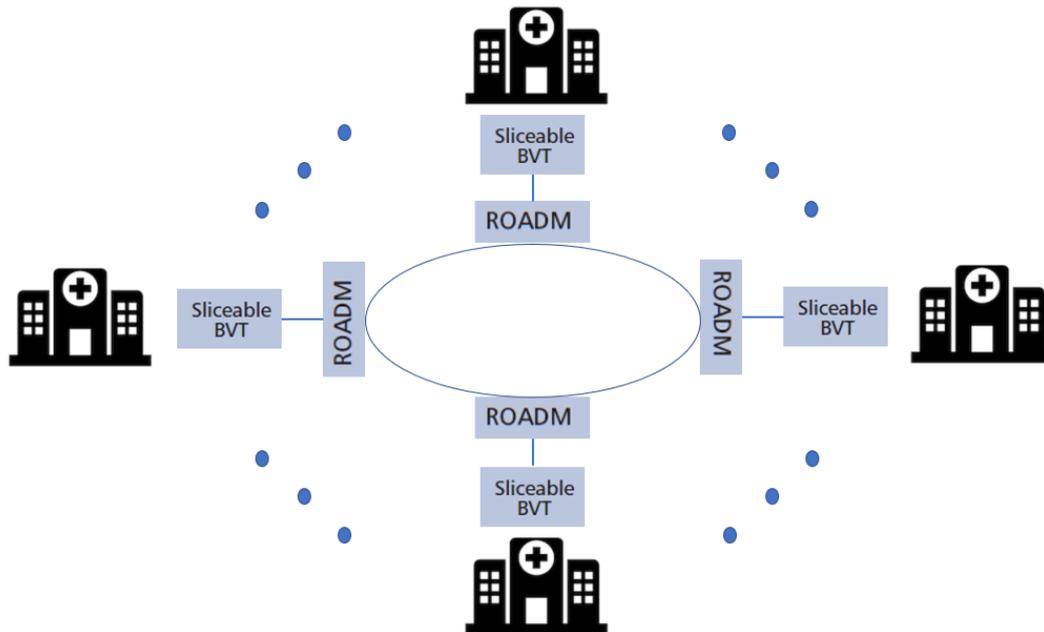


Figura 11. Esquemático de la solución final

Más consideraciones relativas a la solución:

- ➔ Mediante el anillo podemos acceder de un hospital a otro mediante dos rutas, en una dirección del anillo y en la opuesta. Lo cual nos ofrece una cierta seguridad ante particiones. Si quisiéramos hacer más robusto el anillo, se podría optar por otra alternativa como la estrategia BLSR/4 (Bidirectional Line Switching Ring / 4 fibers), en la cual se utilizan 2 fibras útiles y las otras 2 de protección.

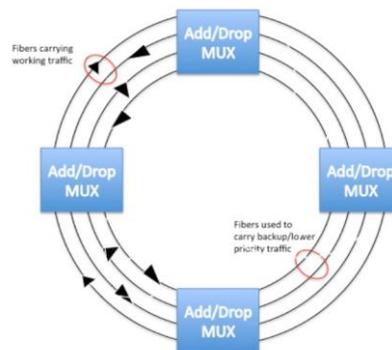


Figura 12. BSLR/4 [14]

- ➔ Las fibras utilizadas entre los hospitales serían monomodo y mono núcleo.

- Los ROADM han de ser:
 - Directionless: La capacidad de directionless permite total flexibilidad de enrutamiento del tráfico en cualquiera de sus nodos independientemente de la vía de entrada y de salida. Cualquier señal puede ser conmutada a cualquier puerto de línea. Al tener estructura de anillo, el hecho de tener un ROADM directionless no es muy relevante.
 - Colorless: En cualquiera de los nodos podemos utilizar cualquier lambda tanto en el tramo de entrada como en el de salida.
 - Flexgrid: Han de soportar ancho de banda flexible.

- Los Sliceable BVTs son los transpondedores sliceables y han de tener tarjetas de línea que soporten varias capacidades. Se ha de realizar un análisis más detallado de capacidades para ajustar el número de tarjetas de línea por hospital. Los Sliceable BVTs en función de la longitud del enlace y de la capacidad demandada, ajustarán la modulación para cada uno de los EOPs.

- La conexión entre hospitales no contiguos se realizará mediante la creación de EOP entre los extremos y mediante el paso por los ROADM de los hospitales que estén de por medio. Un hospital podrá tener conexión con varios hospitales a la vez gracias a la funcionalidad Sliceable de los BVTs.

- En caso de ampliación del número de hospitales, bastaría con añadir al anillo las sedes nuevas. En el caso de que la capacidad no sea suficiente a futuro, se pueden añadir más tarjetas de línea.

- En rejilla flexible no se transmiten canales que su ancho de banda sea menor de 37,5 GHz, ya que los filtros utilizados crean demasiadas pérdidas de inserción. En la banda de paso suelen perder 3 o 4 dB, y para valores de ancho de banda menores a 37,5 GHz incrementarían estas pérdidas [15].

- Aunque no se hayan marcado especificaciones técnicas a cumplir, se deberá de cumplir con los valores de OSNR y BER que se fijen. Por ejemplo, para el caso de utilizar DP-QPSK sería necesario mantener una OSNR mayor de 10,2 dB para obtener una BER de $2E-2$ – necesaria para recibir correctamente después de aplicar un código de corrección de errores –. A este valor es necesario añadir hasta unos 10 dB de margen para tener en cuenta posibles degradaciones, dependiendo del diseño que se haga. Así, para este caso, la OSNR objetivo rondaría los 20,2 dB. Como la detección DPQPSK se basa en un transceptor coherente, no sería necesario compensar dispersión. Realizando un análisis básico de OSNR, partiendo de unas distancias de 40 km por enlace y poniéndonos en el peor de los casos, que es pasar por 29 nodos intermedios, si consideramos dos amplificadores por ROADM y las pérdidas de cada uno de debido a los filtros, estos datos nos llevan a una OSNR mayor de 25 dB, con lo que cumpliríamos con los umbrales propuestos para el ejemplo de DP-QPSK.

5 Conclusiones generales

Tras analizar las distribuciones de rejilla fija y rejilla flexible, se han podido observar las múltiples mejoras de la rejilla flexible, sin embargo, según el caso de uso será más conveniente una solución u otra.

Para clientes que quieran conectar pocas sedes, que tengan claro las necesidades que va a necesitar su red y que el presupuesto sea importante a la hora de elegir una solución, la utilización de rejilla fija puede ser una muy buena elección.

Para clientes que necesiten sobre todo capacidades altas, adaptabilidad de recursos y proyección de crecimiento, nos interesa una solución de rejilla flexible. Aunque de partida es más caro, se hace una inversión a largo plazo en adecuación y eficiencia de la red.

La mejor de las noticias de la aparición de la distribución de la rejilla flexible es la evolución a la llamada EON, una red óptica elástica. Es un nuevo paradigma en las redes ópticas tener la capacidad de adaptarse a los recursos demandados. Si a eso le añadimos la importancia de la arquitectura Slice, con la creación de transceptores virtuales que crean varios EOPs para dar varios servicios desde un único transceptor tenemos grandes mejoras respecto a las redes ópticas tradicionales.

6 Líneas futuras

Con vistas a una posible evolución de este proyecto, se podría optar por la realización de un proyecto profesionalizado en el que se estudie técnica y económicamente las necesidades para montar la solución propuesta. Se podría calcular la OSNR del peor de los tramos, calcular los kilómetros totales de fibra, elegir los equipos transceptores y ROADMs para cumplir con unas especificaciones técnicas y realizar un presupuesto técnico de la solución.

Otra posible propuesta de proyecto es estudiar a fondo la utilización de SDM o DSDM para la realización de este tipo de anillos. Se podría realizar un estudio más teórico en el que se analizarían en detalle las mejoras efectivas en capacidades y las dificultades que podemos encontrar transmitiendo en varios modos y mediante varios núcleos. O bien, podría realizarse un proyecto más profesionalizado, sacando adelante una posible solución, su viabilidad y su coste. El simple hecho de utilizar varios modos y varios núcleos cambia el estudio de viabilidad de forma drástica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report Highlights Tool":
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html#>
- [2] ITU-T G.671, "Transmission characteristics of optical components and subsystems" in ITU-T, August 2019, T-REC-G.671-201908-I.
- [3] ITU-T G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid" in ITU-T, June 2002, T-REC-G.694.1-200206-S.
- [4] ITU-T G.694.2, "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid" in ITU-T, December 2003, T-REC-G.694.2-200312-I.
- [5] ITU-T G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid" in ITU-T, February 2012, T-REC-G.694.1-201202-S.
- [6] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, November 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307468.
- [7] ITU-T Y.3112, "Framework for the support of multiple network slicing" in ITU-T, May 2018, T-REC-Y.3112-201805-S.
- [8] C. Rottondi, P. Boffi, P. Martelli and M. Tornatore, "On the benefits of few-mode transmission in ring metro optical networks with flexible grid," *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Anaheim, CA, 2016, pp. 1-3.
- [9] T. Mizuno, H. Takara, A. Sano and Y. Miyamoto, "Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 582-592, 15 Jan.15, 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2482901.
- [10] "Llista d'Hospitals de Catalunya de la Xarxa d'Hospitals d'Utilització Pública (XHUP), ordenats per regions sanitàries del Servei Català de la Salut." https://ca.wikipedia.org/wiki/Llista_d%27hospitals_de_Catalunya
- [11] "CatSalut. Servicio Catalán de la Salud." <https://catsalut.gencat.cat/ca/centres-sanitaris/cercador/>
- [12] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, February 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6146481.
- [13] "Infinera GX Series – Compact Modular Optical Transport Solutions." <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Infinera-GX-Series-0243-BR-RevC-0920.pdf>
- [14] "Link Protection, Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Link_protection
- [15] J. M. Fabrega, M. Svaluto Moreolo, L. Martín, A. Chiadò Piat, E. Riccardi, D. Roccató, N. Sambo, F. Cugini, L. Potì, S. Yan, E. Hugues-Salas, D. Simeonidou, M. Gunkel, R. Palmer, S. Fedderwitz, D. Rafique, T. Rahman, Huug de Waardt, and A. Napoli, "On the Filter Narrowing Issues in Elastic Optical Networks," *J. Opt. Commun. Netw.* 8, A23-A33 (2016)

LISTADO DE ACRÓNIMOS

EON Elastic Optical Network

EOP Elastic Optical Path

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing

ROADM Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

BVT Bandwidth Variable Transceivers

SDM Space Division Multiplexing

DSDM Dense Space Division Multiplexing

OSNR Optical Signal-to-Noise Ratio

BER Bit error rate

BLSR/4 Bidirectional Line Switching Ring 4 fibers

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ITU International Telecommunication Union