UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN NODO DE CONMUTACIÓN ÓPTICA

Trabajo Final de Grado

Presentado a:

L'Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

Por

Tarik Bissan

Para la obtención de GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

Tutor: Jaume Comellas Colomé

En Barcelona, a 28 noviembre 2014

Abstract

The optical cross-connect (OXC) is a key element in current WDM networks. In this context, the design of OXCs is becoming very challenging since it has to fulfill requirements from legacy optical networks and be future-proof to support both legacy lower bitrates and future high-speed super-channels by means of flexible allocation of spectral resources. In this project we simulate a novel concept known as Architecture on Demand (AoD), in order to propose, responding to previous considerations on the typology of traffic, a specific configuration of the node that includes spatial and spectral switching and the wavelength conversion functionality with a low blocking probability and the minimum amount of modules. Once found the optimal configuration of the node, its performance under different traffic profiles is studied. Results shows that the Architecture on Demand gives better results than conventional architectures and that it has a higher potential for future developments.

Resum

Els nodes de commutació òptica (OXC) es consideren un element clau en les xarxes WDM actuals. Així, el disseny de OXCs s'està convertint en un gran repte ja que ha de respondre als requeriments de les xarxes òptiques actuals i de les futures per poder suportar tant taxes de bit baixes com futurs super-canals d'alta velocitat, mitjançant l'assignació flexible dels recursos espectrals. En aquest projecte es simula el nou concepte anomenat arquitectura sota demanda (AoD) per tal de proposar, en resposta a les consideracions fetes a priori sobre la tipologia del tràfic de xarxa, una configuració del node que inclou commutació espacial i espectral, i la funcionalitat de conversió de longitud d'ona amb una baixa probabilitat de bloqueig, usant la mínima quantitat de mòduls. S'estudia la resposta del node optimitzat per diferents tipus de tràfic. Els resultats mostren que l'arquitectura sota demanda dóna millors resultats que les arquitectures convencionals i té un major potencial per futures desenvolupaments.

Resumen

Los nodos de conmutación ópticos (OXC) se consideran un elemento clave en las redes WDM actuales. Así, el diseño de OXCs se está convirtiendo en un gran desafío pues tiene que responder a los requerimientos de las redes ópticas actuales y de las futuras para poder soportar tanto velocidades de transmisión bajas como futuros super-canales de alta velocidad, mediante la asignación flexible de los recursos espectrales. En este proyecto se simula el concepto novedoso conocido como arquitectura bajo demanda (AoD), con el fin de proponer, en respuesta a las consideraciones *a priori* sobre la tipología de tráfico, una configuración del nodo que incluye conmutación espacial y espectral y la funcionalidad de conversión de longitud de onda con una baja probabilidad de bloqueo, usando la cantidad mínima de módulos. Se estudia mediante simulación la respuesta del nodo optimizado para diferentes tipos de tráfico. Los resultados obtenidos muestran que la arquitectura bajo demanda da mejores resultados que las arquitecturas convencionales y tiene un mayor potencial de desarrollo futuro.

Agradecimientos

Quiero agradecer, especialmente al director de mi proyecto, Jaume Comellas Colomé, que sin su ayuda este trabajo no habría llegado a su buen fin.

Y también, quiero dar las gracias a todos aquellos que me han mostrado su apoyo durante toda la carrera, en especial, a mi familia (Lwalida, Farah, Layla y Amine … etc).

Historial de revisiones y registro de aprobación

Revisión	Fecha	Propuesta
0	24/11/2014	Creación del documento
1	28/11/2014	Revisión del documento

LISTA DE DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO

Nombre	Correo electrónico
Tarik Bissan	tarikbissan@gmail.com
Jaume Comellas Colomé	comellas@tsc.upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Fecha	24/11/2014	Fecha	28/11/2014
Nombre	Tarik Bissan	Nombre	Jaume Comellas Colomé
Posición	Autor del proyecto	Posición	Supervisor del proyecto

Índice

Abstract 2
Resum 3
Resumen 4
Agradecimientos 5
Historial de revisiones y registro de aprobación 6
Índice 7
Lista de gráficas: 8
Lista de tablas: 9
1. Introducción 10
1.1. Propósito, requerimientos y especificaciones 10
1.2. Plan de trabajo 11
2. Estado del arte: 12
3. Desarrollo del proyecto 14
3.1. Arquitectura AoD 14
3.2. Síntesis 14
3.3. Elementos del nodo 16
3.3.1. El “Optical Backplane” 16
3.3.2. Los convertidores de longitud de onda 16
3.3.3. Los “Spectrum Selective Switches SSS” 17
3.4. Parámetros del nodo a estudiar 18
4. Resultados 20
4.1. Análisis del nodo: 21
4.2. Evaluación del nodo para tráficos de diferentes naturalezas 24
5. Presupuesto 26
6. Conclusiones y futuros desarrollos: 27
Bibliografía: 28
Glosario 29

Lista de gráficas:

Gráfica.1. Una implementación del nodo AoD.

Gráfica.2. Respuesta del nodo AoD adaptado a un determinado tráfico.

Gráfica.3. Backplane Óptico.

Gráfica.4. Convertidor de longitud de onda.

Gràfica.5. Diagrama funcional de un WSS.

Gráfica.6. Modelo del módulo WSS.

Gráfica.7. Probabilidad de bloqueo en función del tráfico.

Gráfica.8. Probabilidad de bloqueo en función del número de convertidores de longitud de onda para diferentes números de entradas del módulo SSS.

Gráfica.9. Probabilidad de bloqueo en función del número de entradas del módulo SSS para diferentes números de convertidores de longitud de onda.

Gráfica.10. Comparación de la configuración optimizada con la inicial.

Gráfica.11. La probabilidad de bloqueo en función del ancho de banda máximo para diferentes tráficos.

Gráfica.12. La probabilidad de bloqueo en función del tráfico para diferentes configuraciones del ancho de banda máximo.

Lista de tablas:

Tabla.1. Los grandes bloques en los que se basó la planificación.

Tabla.2. Diagrama de Gant.

Tabla.3. Resumen del diseño del nodo.

Tabla.4. Coste del proyecto.

1. Introducción

El ser humano desde sus inicios ha buscado suplir sus necesidades, éstas cada vez mas exigen mayor comodidad y mejor calidad de vida y en la mayoría de ocasiones requieren retos tecnológicos que tienen que solucionarse a priori. Por ejemplo, aplicaciones de última generación, redes sociales, videos en línea, audios multicanal, transferencia de archivos, videojuegos, etc., requieren un ancho de banda que aparte de ser grande es variable, lo que propicia que la transferencia de archivos tienda poco a poco a ser simétrica, es decir, que los usuarios tengan la misma velocidad de transferencia para subir como para bajar archivos. Por la misma razón, los usuarios en la actualidad son en mayor proporción la fuente generadora de la información.

Por lo tanto, a la hora de diseñar las redes, es muy importante tener en cuenta las tendencias y las necesidades de los usuarios con el fin de responder a los requerimientos que plantean estos nuevos escenarios.

El ancho de banda requerido por los servicios es dinámico, lo que exige de dispositivos capaces de adaptar su arquitectura en función de la tipología del tráfico

Las altas velocidades de transmisión y conmutación requeridas y la característica variable del tráfico implica disponer de sistemas que puedan tener la capacidad de soportarlas y, a la vez, adaptarse a sus necesidades. En este caso, las arquitecturas flexibles son indispensables para alcanzar estos objetivos y así responder positivamente a las necesidades de los usuarios.

1.1. Propósito, requerimientos y especificaciones

Como se ha comentado anteriormente, en un escenario en el que la tipología del tráfico es compleja y variable, las arquitecturas flexibles son imprescindibles para poder ofrecer una buena calidad de servicio de un modo eficiente.

A fin de dar respuesta a estos requerimientos, el presente trabajo tiene como objeto diseñar, simular y optimizar un nodo de conmutación flexible que pueda soportar el tráfico fijado por la tendencia de los usuarios. Este nodo ha de ser capaz de adaptar su arquitectura de forma dinámica a las necesidades del tráfico de entada.

Una vez simulado el comportamiento del nodo y encontrada la configuración que lo optimiza lo evaluaremos para tráficos de diferentes naturaleza~~s~~.

La arquitectura propuesta en este trabajo está basada en la arquitectura bajo demanda (Architecture on Demand), en adelante AoD, arquitectura que ha sido principalmente desarrollada en el documento [1]: "*[…]an optical cross-connect (OXC) that can implement and dynamically adapt its architecture in real time in order to provide the required functionality to fulfil the switching and processing requirements of network traffic.*"

La aportación de este trabajo será la introducción de Convertidores de Longitud de Onda, elemento que mejorará el comportamiento del nodo AoD. Con el fin de simular el comportamiento del nodo, inicialmente se harán las siguientes consideraciones:

- cuatro puertos de entrada y cuatro de salida al nodo;
- un ancho de banda total de 160;
- las peticiones tendrán un ancho de banda máximo de 10;
- el ancho de banda de los canales seguirá una distribución uniforme;

Encontrada la configuración del nodo que optimiza su comportamiento, veremos el impacto que tiene variar el ancho de banda máximo de los canales sobre la probabilidad de bloqueo.

1.2. Plan de trabajo

Como resulta de la siguiente tabla, el trabajo se ha desarrollado en cinco grandes bloques:

Bloque 1	**Análisis de la arquitectura**
	Definición de los diferentes elementos que compondrán el nodo
Bloque 2	**Modelar matemáticamente el comportamiento de cada uno de estos elementos**
Bloque 3	**Programar en Matlab las funciones que simulan el comportamiento de cada uno de estos elementos**
	Integración de estas funciones
Bloque 4	**Simulación**
	Optimización y nueva simulación
Bloque 5	**Redactar**

Tabla.1. Los grandes bloques en los que se basó la planificación.

Como se puede ver en el diagrama de Gant, la planificación inicial del trabajo sufrió cambios importantes. Ello implicó que se aplazara la fecha de entregada de este documento para finales de noviembre, inicialmente su entrega estaba prevista para mediados de julio.

En verde mostramos la planificación inicial y en azul la real.

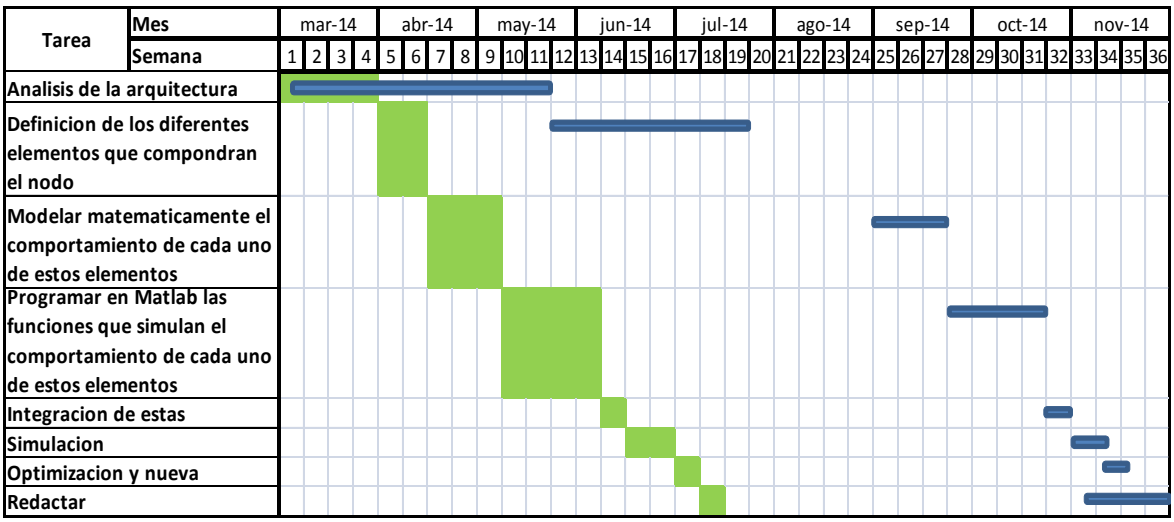


Tabla.2. Diagrama de Gant.

2. Estado del arte:

Las redes ópticas actuales explotan al máximo los beneficios del WDM "Wavelength Division Multiplexing". El escenario convencional del WDM capitaliza en el ancho de banda una multitud de longitudes de onda por medio de slots bien definidos en el espectro óptico. Las conexiones cruzadas (OXCs) tradicionales cumplían el simple requerimiento de proveer el mismo servicio por grado y por longitudes de onda específicas. Sin embargo, investigaciones recientes en redes ópticas están apostando por una asignación flexible de los recursos espectrales. En particular, las redes ópticas del futuro pueden ser capaces de manejar anchos de banda desde sub-ancho de banda hasta el súper-ancho de banda por medio de canales ópticos bien definidos para maximizar la eficiencia espectral.

Tres claros ejemplos de tecnologías que requieren de una alta flexibilidad en la asignación espectral son: El concepto SLICE que ajusta el ancho de banda del canal mediante la variación del número de sub-portadoras en la señal OFDM transmitida [2]; Sistemas de conmutación de paquetes ópticos que usan longitudes de onda paralelas para la transmisión de paquetes [3];Y las redes elásticas basadas en una sola portadora que adapta el formato de la modulación de las señales transmitidas para velocidades de datos altas mediante la explotación de márgenes OSNR adicionales [4].

Tales tecnologías emergentes requieren de una nueva generación de *MD-ROADMs (multi-degree reconfigurable optical add/drop multiplexers) y OXCs*. De ahí que este tipo de sistemas ópticos deban evolucionar desde la prestación de servicios para un grado y longitudes de onda específicas hacia una conmutación flexible y adaptable a los diferentes tipos de tráfico.

Por una parte, las arquitecturas tradicionales OXC están evolucionando desde la conmutación del tráfico a nivel de longitud de onda hacia el Multi-Granular OXC (MG-OXC) que realiza la fibra, el ancho de banda o la conmutación en longitud de onda [5], [6]. Por otra parte, MD-ROADMs, están cambiando desde ROADMs con una simple agregación de un solo grado hacia ROADMs incoloras, sin dirección y sin contienda "*colorless, directionless and contentionless (C/D/C-less)",* ni longitud de onda en los puertos add/drop ni el grado de los transponedores son específicos, [7] y [8].

Sin embargo, estos enfoques tienen dos inconvenientes principales: 1) A menudo consisten en un configuración cableada de los dispositivos que restringen la capacidad de actualización, lo que limita el apoyo a nuevas funcionalidades y reduce la capacidad de adaptación de la arquitectura a las nuevas exigencias de la red. Incluso en el caso de que estas arquitecturas estén basadas en Conmutadores Selectivos en Espectro (SSS), funcionalidades como fragmentación espectral, conmutación temporal, regeneración u otros métodos de procesamiento de señal no pueden ser implementadas. Por lo tanto, estas arquitecturas carecen de la *flexibilidad* deseable por las redes ópticas del futuro; 2) Las propuestas recientes, como MG-OXCs y CDC-ROADMs se diseñan frecuentemente con el objetivo de alcanzar un servicio por granularidad, es decir: grado, puerto, ancho de banda o longitud de onda. Este tipo de diseño implica el despliegue de un dispositivo por granularidad. Además, este tipo de arquitecturas está muy limitado por el número de dispositivos y el de puertos de cada uno de ellos.

En este proyecto, evaluamos estas limitaciones explotando los beneficios de la "*Architecture On Demand (AoD)*" [8], definida como conexiones cruzadas ópticas (OXC)

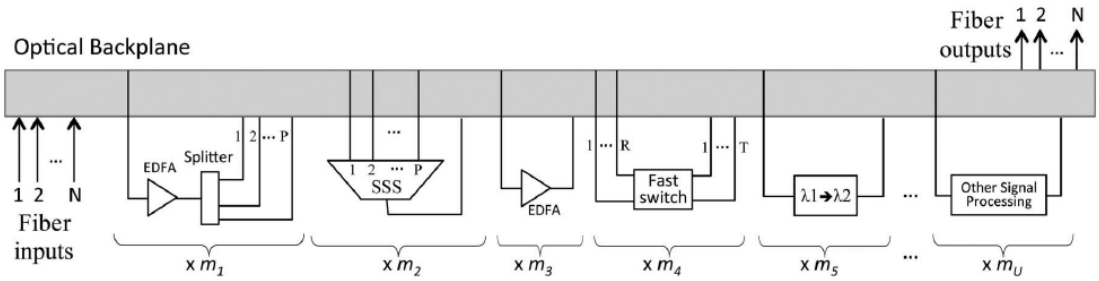
que es capaz de implementar y adaptar de forma dinámica y en tiempo real su arquitectura con el fin de proporcionar las funcionalidad requeridas para satisfacer los requerimientos de conmutación y de procesamiento del tráfico de red.

3. Desarrollo del proyecto

3.1. Arquitectura AoD

El nodo AoD es una arquitectura que usa conexiones cruzadas OXC que tiene la capacidad de adaptarse a los requerimientos del tráfico de red.

La Figura.1 muestra una posible implementación del nodo AoD consistente en una Backplane Óptico que interconecta los puertos de entrada, los de salida y el resto de módulos que componen el nodo, este, como elemento principal que es, puede ser implementado usando por ejemplo 3D-MEMS [4]. El resto de elementos que componen el nodo pueden ser por ejemplo MUX, DEMUX, Conmutadores Selectivos en Espectro (SSS), convertidores de longitud de onda, amplificadores, etc.



Grafica.1. Una implementación del nodo AoD.

Un conjunto de N fibras de entrada están conectadas a un conjunto de N fibras de salida mediante conexiones cruzadas OXC. Por ejemplo, las entradas pueden ser conectadas a través de un módulo o directamente a la salida, usando las conexiones cruzadas que proporciona el Backplane Óptico. Cuando un módulo es requerido para conectar la entrada, un segundo módulo o más pueden ser usados con el fin de responder a las necesidades del tráfico de red para conmutar dicha señal a la salida requerida.

En este trabajo serán considerados únicamente 4 fibras de entrada y 4 de salida, el Backplane Óptico, Conmutadores Selectivos en Espectro (SSS) y convertidores de longitud de onda.

3.2. Síntesis

Nos centramos en un escenario de conmutación en el que un alto nivel de control es requerido para calcular las necesidades del tráfico de entrada (4 fibras de entrada con un ancho de bando total de 160 para cada una de ellas).

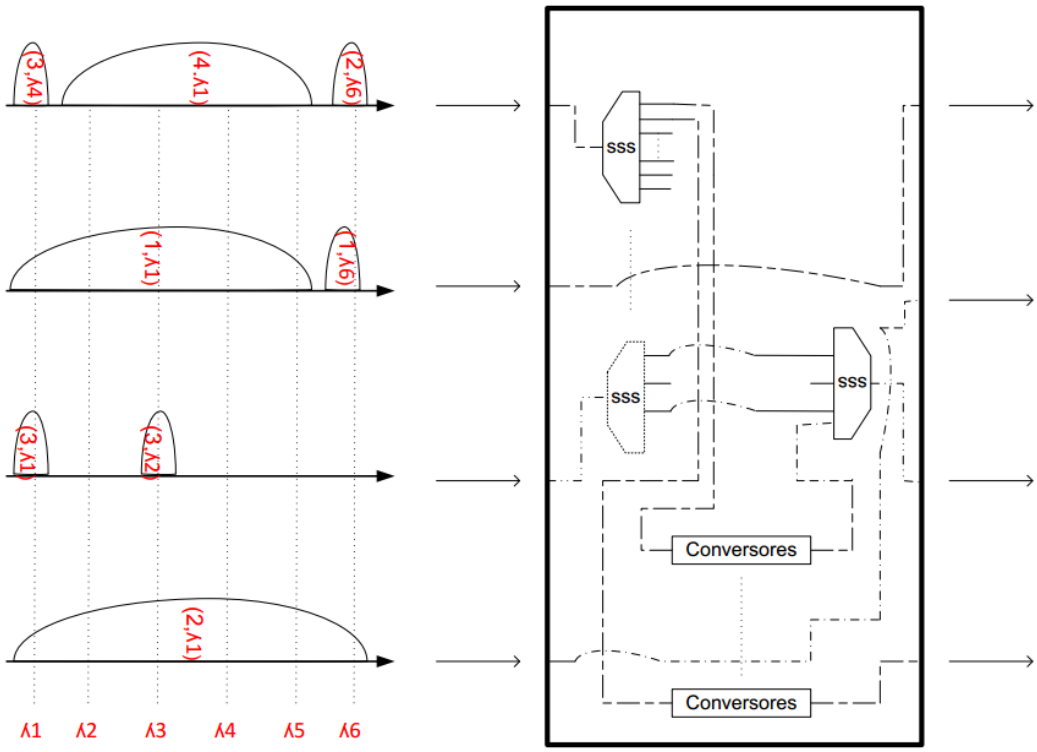
Representamos los requerimientos de conmutación por una matriz *A* de *N x W x 3*: los elementos *A(i,j,1)* indican el puerto de salida requerido por la entrada " *i* " y la longitud de onda " *j* "; los elementos A(i,j,2) indican la longitud de onda de salida (puede ser diferente a la de entrada); y los elementos A(i,j,3) indican el ancho de banda de la señal.

Un índice de puerto y longitud de onda de salida, puede aparecer más de una vez en la matriz A, de allí el bloqueo del tráfico. El nodo AoD, tras recibir la información de entrada A, realiza los cálculos necesarios a fin de responder a las necesidades de este tráfico y proporcionar las conexiones cruzadas y los módulos necesarios para conmutar este tráfico hasta su debido destino.

En este trabajo, para simular el comportamiento del nodo AoD, se hacen las siguientes consideraciones: Las llegadas como una variable aleatoria de Poisson; la fibra de destino como una variable aleatoria uniforme en [0,4]; la longitud de onda como una V.A uniforme en [0,160]; y el ancho de banda como una V.A uniforme en [0,10].

La siguiente Grafica 2(a) muestra un ejemplo de una matriz A compuesta de 4 fibras y 6 longitudes de onda (N=4, W=6). El ejemplo consiste en un escenario de tráfico heterogéneo formado por 8 peticiones en total, 5 de las cuales con un ancho de banda unitario y las otras 3 de ancho de banda superior a uno. En color rojo se indica la información relativa al destino (puerto de salida, longitud de onda de inicio) requeridos por el tráfico de entrada.

La Gráfica 2(b) muestra una posible interconexión del nodo AoD para responder a los requerimientos de entrada. Como se puede observar, no todas las peticiones requieren de una funcionalidad espectral, como es el caso de las fibras 2 y 4, por eso el nodo no usó ningún módulo para interconectar la fibra 2 con la fibra 1, a este tipo de conexiones llamaremos conexiones directas, y al resto, conexiones indirectas.



Gráfica.2(a). Matriz de información. ***Gráfica.2(b). Una posible respuesta del nodo.***

Gráfica.2. Respuesta del nodo AoD adaptado a un determinado tráfico.

Para poder simular el comportamiento del nodo, a esa información de entrada tendremos que añadir una cuarta dimensión indicando la duración de las conexiones, puesto que no se trata de una información de la que dispone el nodo a priori sino que se trata de una

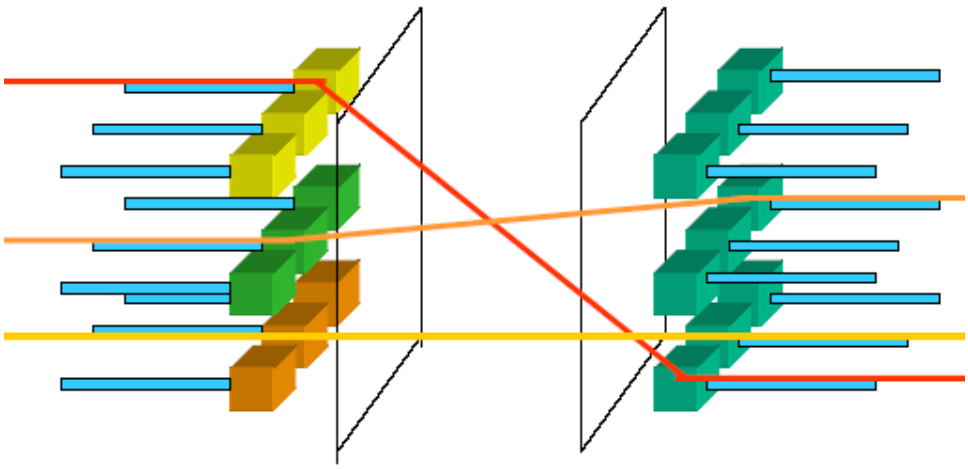
variable aleatoria que sigue una distribución, según las consideraciones hechas en este trabajo, exponencial.

3.3. Elementos del nodo

3.3.1. El "Optical Backplane"

El Backplane óptico puede ser considerado como un gran conmutador que conecta las entradas y salidas utilizando conexiones cruzadas.

Tecnológicamente, puede ser implementado utilizando "20ms 96x96 3D-MEMS". La siguiente figura muestra un ejemplo básico de la tecnología 3D-MEMS.



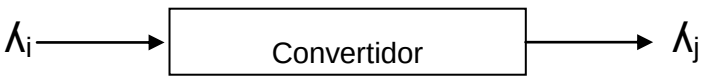
Gráfica.3. Backplane Óptico.

Para poder simular este módulo en Matlab, necesitamos formular matemáticamente su comportamiento. Para ello, implementamos el Backplane como una matriz B de dimensión 96x96 donde los elementos B_{ij} indican las conexiones que están activadas poniéndolas a "1" (por ejemplo: B_{34}=1, implica que la entrada 3 se conectará con la salida 4). Una entrada solo puede ser conectada con una única salida lo que implica que cuando un elemento de la fila está a "1" el resto tendrá que estar a cero.

La adaptación de estas interconexiones a las necesidades del tráfico proporcionará flexibilidad al nodo

3.3.2. Los convertidores de longitud de onda

Los convertidores de longitud de onda desplazan la señal en el espectro desde una longitud de onda hacia otra.



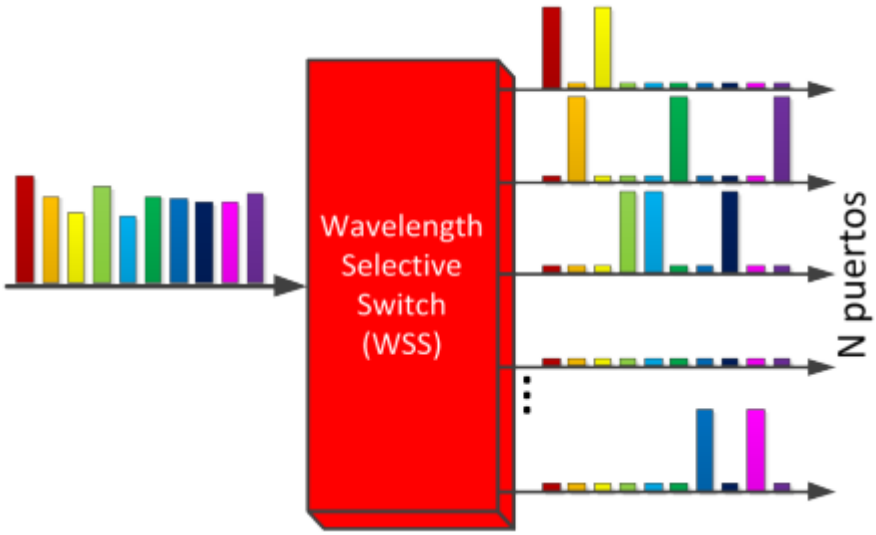
Grafica.4. Convertidor de longitud de onda.

Lo único que deberá realizar la función a implementar en Matlab será desplazar la espectro de entrada hacia la longitud de onda requerida.

3.3.3. Los "Spectrum Selective Switches SSS"

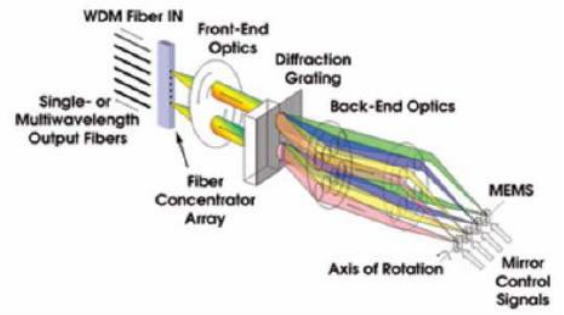
El módulo SSS es un elemento clave para proporcionar flexibilidad a las arquitecturas, de hecho, todas las arquitecturas flexibles (SR, BS, etc.) utilizan el SSS como módulo principal en su diseño. Estos dispositivos son muy adecuados en los nodos flexibles, ya que cuentan con una alta granularidad espectral que permite la implementación de filtros con una capacidad de adaptación alta y con ancho de banda variable.

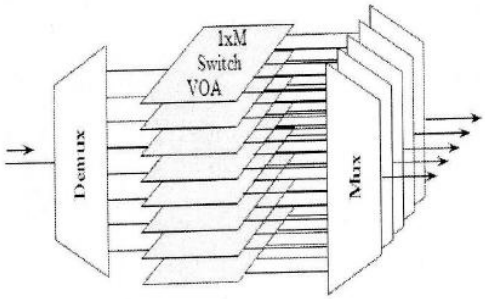
Operan en las dos direcciones: En una, opera como un MUX, separa las longitudes de onda y coloca cada una en una determinada salida; Y, en la otra dirección, opera como un DEMUX coloca todas las longitudes de onda en un único puerto de salida y bloquea las longitudes de onda restantes. Esta se consigue respondiendo a las funcionalidades requeridas por el tráfico y previamente calculadas por el controlador del nodo AoD con el fin de adaptarse a los requerimientos del mismo.



Gráfica.5. Diagrama funcional de un WSS.

En este trabajo, para poder simular el SSS en Matlab hemos utilizado el modelo del Conmutador Selectivo en Longitud de Onda, que desde el punto de vista funcional, puede confundirse el modelo de uno con el otro. Como podemos ver en la figura siguiente, el WSS es un módulo que se compone de tres sub-módulos; DEMUX, 1xM Switch VOA y MUX; Para poder implementar esta función bidireccional en Matlab, de algún modo tendremos que indicar que queremos operar en una dirección u otra, por así, el orden de los sub-módulos será diferente (Como 1xSSS_m, el orden será: DEMUX, Switch y luego MUX, y como SSS_m x 1, el orden será: MUX, Switch y luego el DEMUX).





Gráfica.6(a). Modelo practico. *Gráfica.6(b). Modelo para la simulación.*

Gráfica.6. Modelo del módulo WSS.

Como podemos observar en el modelo de los tres sub-módulos están conectados de tal manera que se alcancen las funcionalidades deseadas. El DEMUX coloca las entradas en la diagonal de una matriz WxW, y el MUX en una de 1xW. El conmutador es el sub-módulo "inteligente", bloquea y da paso al tráfico en función de la información de control que recibe del controlador del nodo, por lo que en Matlab la matiz que implementara este sub-módulo variará en función de la información de control.

3.4. Parámetros del nodo a estudiar

Los parámetros principales que tendrán un impacto en el comportamiento del nodo serán el tipo de elementos que lo compondrán, el número de elementos y su dimensión (número de entradas/salidas).

Dado que en este trabajo solo hemos considerado el Backplan óptico, el SSS y el convertidor de longitud de onda. Y, por otra parte, el número de conmutadores está fijado en 4. Los parámetros que nos quedan a estudiar serán:

- El número de entradas/salidas del modulo SSS_m;
- El número de convertidores;
- Ancho de banda;
- Tráfico de red;

En el primero estudio, con el objetivo de determinar la configuración de los elementos del nodo que optimizan su comportamiento, se hará fijando un ancho de banda máximo de 10 y un tráfico a la entrada que variará en función de las necesidades del estudio.

Como podemos observar, para poder conmutar directamente todas las conexiones, el mínimo número de puertos ha de coincidir con el número de fibras de entrada o salida. Por lo que dependiendo del número de convertidores de longitud de onda que tenemos, el número de entradas/salidas del módulos SSS necesarios para alcanzar la probabilidad de bloqueo máxima deseada puede ser diferente. Así, el objetivo de este estudio será encontrar la configuración que nos asegura cumplir con los requisitos de calidad mínimos.

Como pudimos apreciar en el parágrafo anterior, el número de convertidores de longitud de onda será un parámetro importante a analizar en profundidad. Pues es el que marca

la diferencia respecto a las demás arquitecturas flexibles, es lo que proporciona al nodo ese valor añadido de flexibilidad espectral.

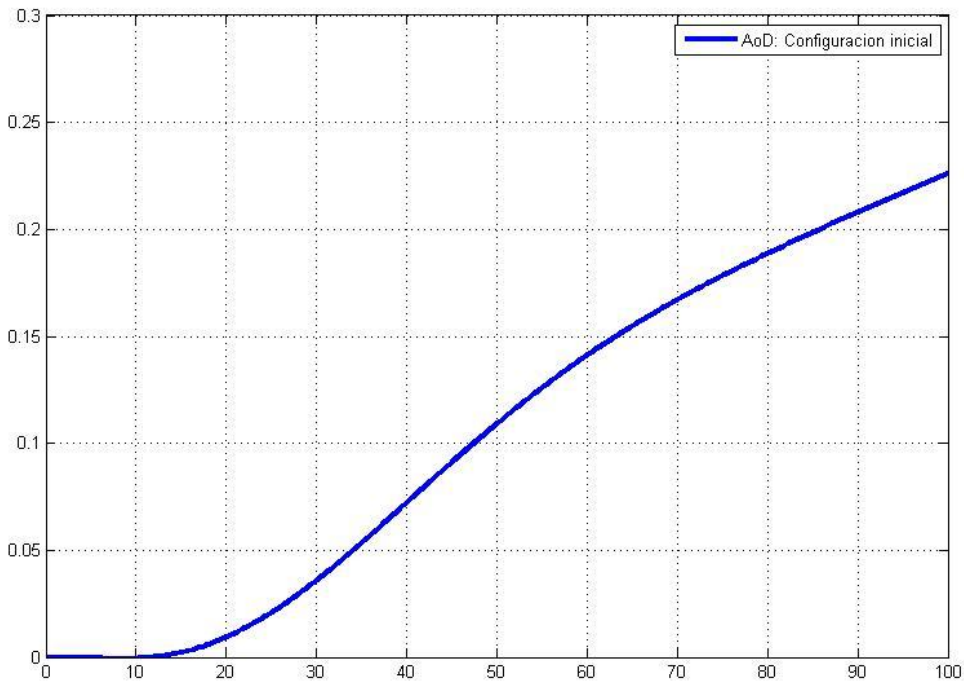
Una vez completado este primer estudio y encontrada la configuración del nodo que optimiza su comportamiento y responde satisfactoriamente a las necesidades del tráfico de red, proporcionando una calidad de servicio máxima. Se procederá a analizar el nodo para tráficos de diferentes tipo y ver qué impacto tendrá sobre el nodo un ancho de banda diferente del supuesto anteriormente.

A todos estos parámetros se añadirá otro muy importante: el máximo tráfico que puede soportar el nodo y que le permita alcanzar los requerimientos de calidad mínimos. Este tráfico se obtendrá dividiendo la duración de las peticiones por el tiempo entre llegadas. Como es de prever, a medida que crece el tráfico, crece la probabilidad de bloqueo, por eso es importante analizar el comportamiento del nodo para diferentes niveles de tráfico.

4. Resultados

En este capítulo, a fin de decidir la configuración más eficiente del nodo, se analizarán los diferentes parámetros mencionados en el capítulo *Parámetros a estudiar*. Una vez realizado el análisis, se reconfigurará el nodo con los resultados obtenidos y se procederá a evaluarlo para tráficos a la entrada de diferentes características y la comparación con las demás arquitecturas mencionadas anteriormente.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento del nodo para una configuración con cuatro convertidores de longitud de onda y 4 módulos SSS con 4 entradas cada uno.



Gráfica.7. Probabilidad de bloqueo en función del tráfico.

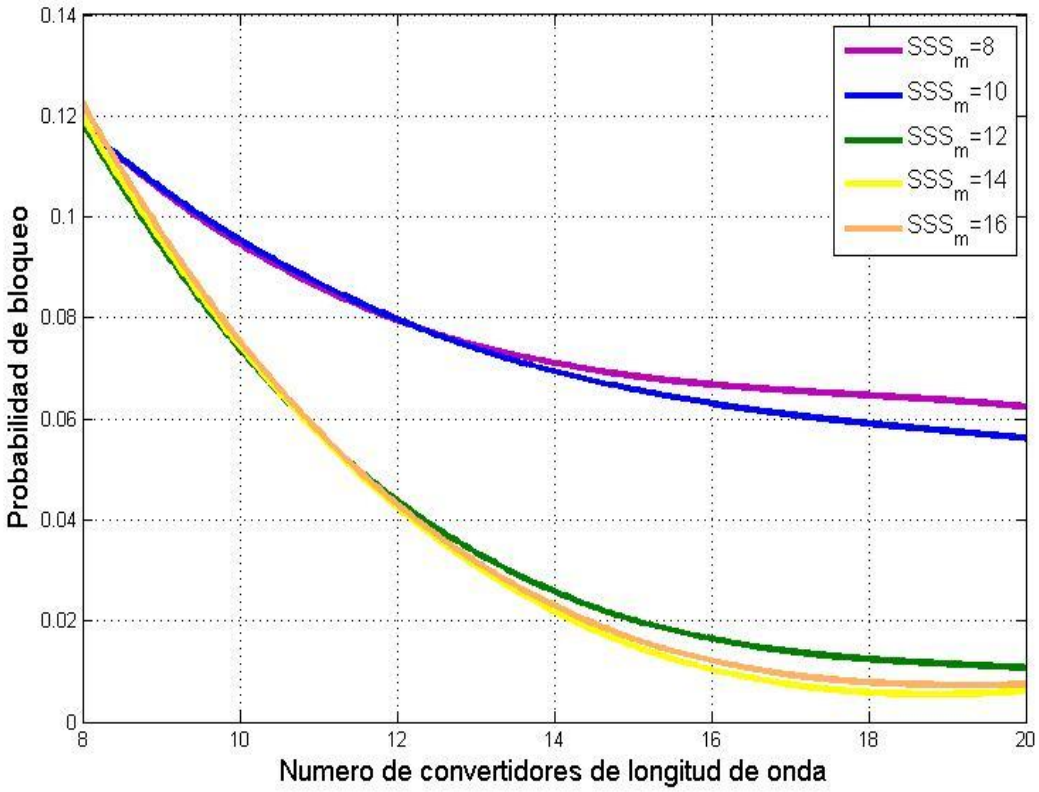
Como se puede ver en la gráfica 7, el comportamiento del nodo AoD no es nada óptimo. Para alcanzar los niveles de calidad que se han propuestos (una probabilidad de bloqueo máxima del 2%), tenemos que analizar en profundidad su comportamiento con el fin de encontrar la configuración que hace posible estos requisitos de calidad para tráficos elevados.

4.1. Análisis del nodo:

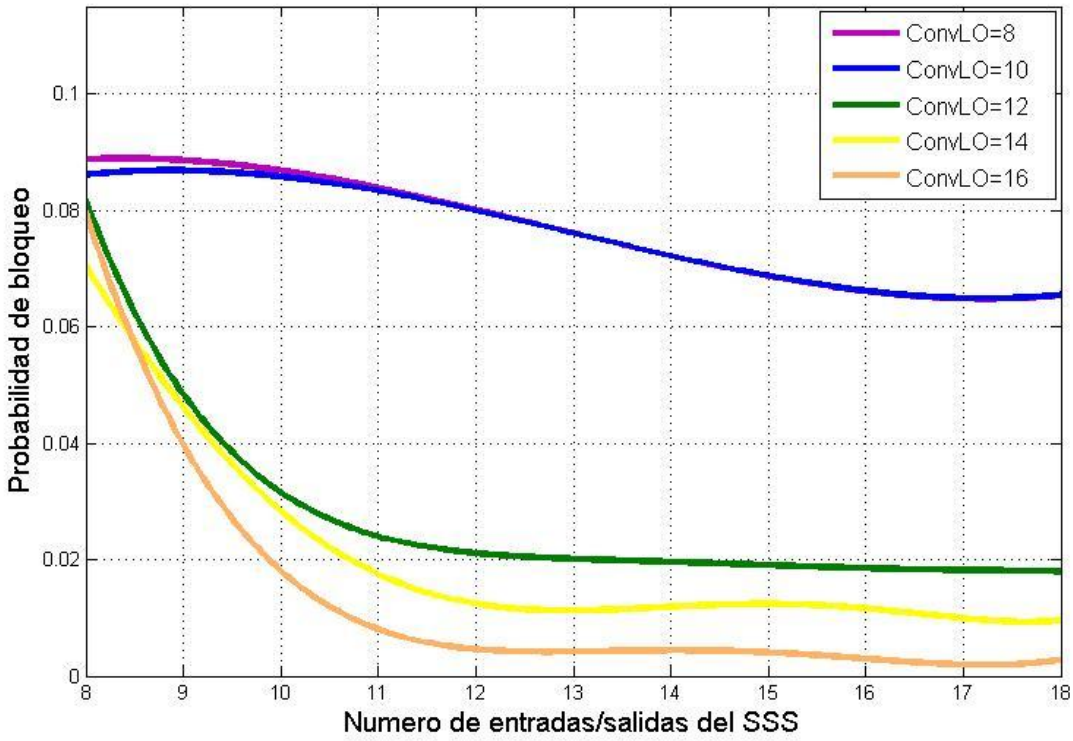
Para poder llevar a cabo el análisis del nodo AoD y encontrar la estructura que maximiza su configuración, se han hecho las siguientes consideraciones:

- El tiempo entre llegadas es una una variable aleatoria que sigue la distribución de Poisson;
- La duración de la llamadas es una variable aleatoria Exponencial (de media mu= 100 unidades de tiempo);
- El tráfico de llegada se obtendrá dividiendo la duración de las llamadas por el tiempo entre llegadas;
- Se fija, inicialmente, el tráfico de entrada en 100, lo que implica que la tasa de llegadas será de 1 llegada por unidad de tiempo (habrá 100 llegadas de media en el intervalo de 100 unidades de tiempo que dura la llamada);

Con las consideraciones anteriores, y tras realizar varias simulaciones, se han conseguido las siguientes gráficas.



Gráfica.8. Probabilidad de bloqueo en función del número de convertidores de longitud de onda para diferentes números de entradas del módulo SSS.



Gráfica.9. Probabilidad de bloqueo en función del número de entradas del módulo SSS para diferentes números de convertidores de longitud de onda.

En la Gráfica.8 se observa que cuando el número de entradas del módulo SSS es superior a 10 el comportamiento del nodo es prácticamente el mismo y por consiguiente no influye en la probabilidad de bloqueo. El hecho de tener un número de convertidores de onda superior a 16 no implica una mejora en la probabilidad de bloqueo. Esto sucede porque no todas las entradas del módulo SSS son usadas ni todos los convertidores se utilizan en un mismo módulo sino por propiedad del nodo, los recursos son compartidos entre todos los elementos del nodo. **Por lo tanto, el número de entradas mínimo del módulo SSS que nos garantiza un comportamiento optimizado es $\boldsymbol{SSS_m = 12}$.**

En la Gráfica.9, se confirma que cuando el número de entradas del módulo SSS es superior a 12 no hay una mejora en la probabilidad de bloqueo, por lo tanto **el número de entradas del módulo SSS que optimiza el comportamiento del nodo es SSS_m=12**. Por otra parte, **el número de convertidores de longitud de onda que nos garantiza una probabilidad de bloqueo máxima de 0.02 es $\boldsymbol{Conv_{LO} = 12}$.**

A partir de los parámetros encontrados podemos definir las dimensiones mínimas del Backplane que permite interconectar todos los elementos ($SSS_m = 12, Conv_{LO} = 14$) del nodo:

$$BPinputs = 4 \times SSS_m + Conv_{LO} + 4 \times Fibras = 66$$

Como hemos comentado en capítulos anteriores, el Backplane puede ser implementado con un 96x96 3D-MEMS Backplane Óptico que no solo nos ofrecerá la posibilidad de

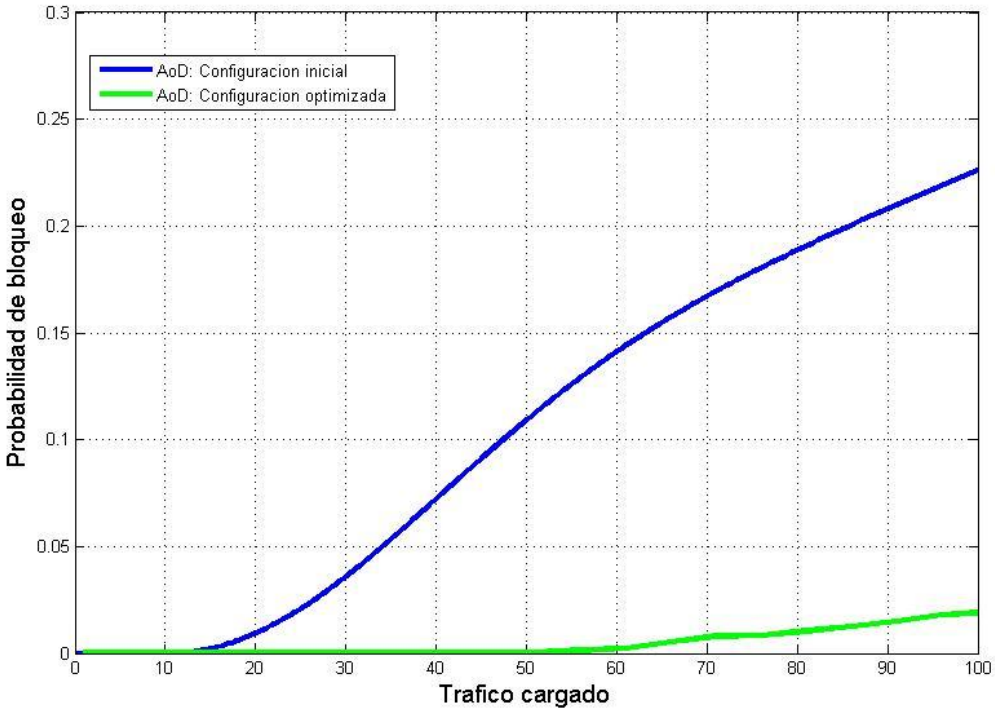
interconectar todos los elementos actuales, sino que también nos ofrece la posibilidad de conectar otros elementos.

La siguiente tabla resume el diseño optimo de nuestro nodo:

Elemento	Cantidad	Dimensión
Optical Backplan	1	96x96
SSS	4	1x13
Convertidor de longitud de onda	14	1x1
Fibras de entrada	4	----
Fibras de Salida	4	----

Tabla.3. Resumen del diseño del nodo.

Una vez encontrados los parámetros que optimizan el comportamiento del nodo AoD, volvemos a simularlo con el fin de comparar su comportamiento en las dos configuraciones: la inicial (SSS_m=4 i Conv_m=2) y la optimizada.



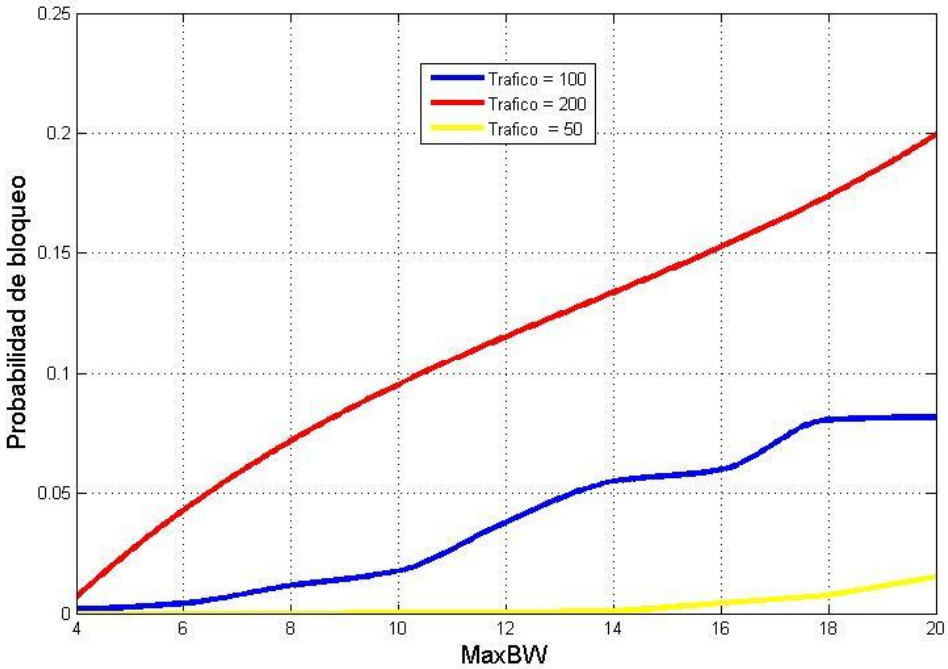
Gráfica.10. Comparación de la configuración optimizada con la inicial.

En la Gráfica.10, se aprecia una mejora importante en el comportamiento del nodo gracias a la configuración optimizada del mismo. Se ha logrado rebajar la probabilidad de bloqueo en un 86% para el caso de tráfico a la entrada de 100.

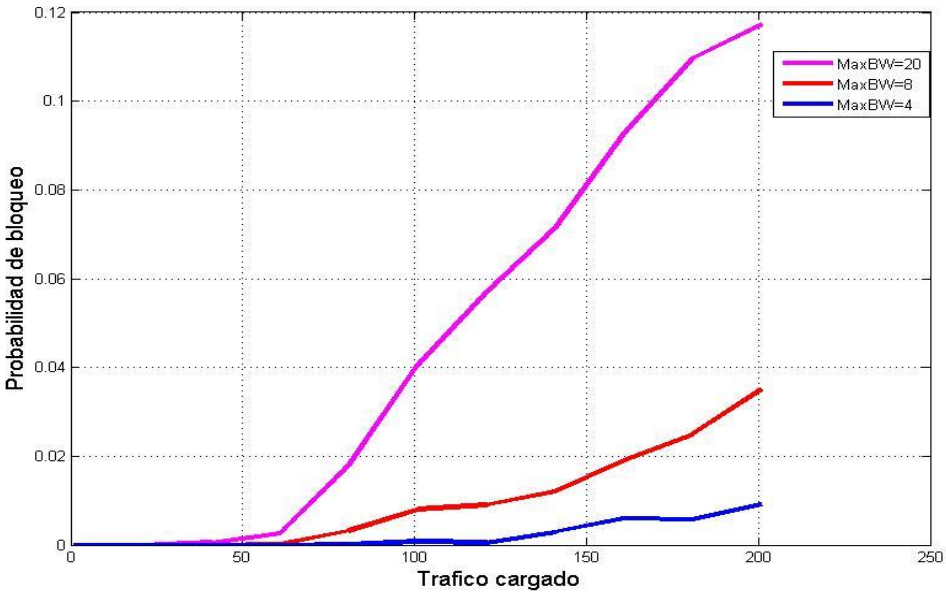
4.2. Evaluación del nodo para tráficos de diferentes naturalezas

En este apartado procederemos a evaluar el nodo considerando anchos de banda máximos diferentes, y así ver el impacto que tiene éste sobre el nodo.

En la figura siguiente mostramos la probabilidad de bloqueo en función del ancho de banda máximo.



Gráfica.11. La probabilidad de bloqueo en función del ancho de banda máximo para diferentes tráficos.



Gráfica.12. La probabilidad de bloqueo en función del tráfico para diferentes configuraciones del ancho de banda máximo.

En la gráficas anteriores se observa: para garantizar una probabilidad de bloqueo máxima del 2%, el tráfico de 200 puede ser conmutado con un ancho de banda máximo de 5; para el caso de trafico de 100 el ancho de banda máximo soportado es de 12; y finalmente para conmutar tráficos de red de 50 el nodo podrá alcanzar los requerimientos de calidad aun con un ancho de banda máximo de 20.

El diseño del nodo ha sido realizado fijando unos parámetros iniciales (ancho de banda máximo de 10 y tráfico de 100), de allí que cuando los valores de estos dos parámetros superan los usados para encontrar la configuración optimizadora del nodo observamos que ya no se alcanzan los requerimientos de calidad (probabilidad de bloqueo máxima de 0.02). Podemos volver a realizar las simulaciones del apartado anterior para encontrar la configuración óptima dado un nuevo escenario de tráfico.

Sin embargo, y como podemos observar en la formula siguiente, el número de conexiones es inversamente proporcional al ancho de banda, y poner más convertidores de longitud de onda no supondrá una mejora dado que el problema responde a un factor físico de falta de espacio.

$$E = \frac{Wxn}{E\{Bw\}}$$

5. Presupuesto

En este trabajo no hicieron falta elementos físicos porque el objetivo no era crear ningún prototipo, por lo que, para hacer el presente estudio, se consideró un ingeniero junior con una dedicación de 20 horas/semanales durante 4,25 meses.

	Horas dedicadas al proyecto	Coste/hora	Total
Análisis de la arquitectura	80	10,00 €	800,00 €
Definición de los diferentes elementos que compondrán el nodo	40	10,00 €	400,00 €
Modelar matemáticamente el comportamiento de cada uno de estos elementos	60	10,00 €	600,00 €
Programar en Matlab las funciones que simulan el comportamiento de cada uno de estos elementos	80	10,00 €	800,00 €
Integración de estas funciones	20	10,00 €	200,00 €
Simulación	40	10,00 €	400,00 €
Optimización	10	10,00 €	100,00 €
Volver a simular	10	10,00 €	100,00 €
Total:	3.400,00 €		

Tabla.4. Coste del proyecto.

6. Conclusiones y futuros desarrollos:

Este trabajo pretende demostrar que la arquitectura AoD presenta mejores resultados que las arquitecturas convencionales en cuanto a capacidad de adaptare a los nuevos requerimientos del tráfico de red planteados por el nuevo escenario tecnológico, en el que una gran cantidad de datos es generada por los usuarios de diferentes aplicaciones. Esto implica que los elementos del nodo sean compartidos entre todos los puertos, con el fin de optimizar su aprovechamiento y abaratar su coste.

En este trabajo se ha realizado el estudio básico para demostrar las mejoras que podemos introducir en este tipo de nodos escogiendo bien los elementos que lo conforman y sus dimensiones.

Las ventajas y prestaciones de esta arquitectura son únicas y muy atractivas. Su principal aplicación está recomendada especialmente para aquellas situaciones en las que las técnicas convencionales no son buenas, situaciones en las que hay tráficos de diferentes naturalezas, desde ancho de banda muy bajo hasta los super-canales.

El nodo diseñado en este trabajo se compone básicamente de tres tipologías de elementos; el módulo SSS, el Backplane Óptico y los Convertidores de longitud de onda. Se ha analizado el número óptimo de elementos necesarios del nodo para una determinada carga, así como la influencia de cada uno de los elementos en las prestaciones del nodo global.

Finalmente, cabe destacar que el código implementado en este trabajo puede ser aprovechado para futuros estudios, en los que se tengan en consideración nuevos módulos y/o se estudien nuevos parámetros.

Bibliografía:

[1] M. Garrich, N. Amaya, G. Zervas, P. Giaccone, D. Simeonidou. "Architecture on Demand: Synthesis and scalability". In 2012 16th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 17-20 April 2012, Colchester, UK. pp. 1-6. DOI: 10.1109/ONDM.2012.6210271.

[2] 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," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, 2009.

[3] N. Wada, S. Shinada, and H. Furukawa, "Modulation format free optical packet switching technology," in International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4, IEEE, 2010.

[4] O. Rival and A. Morea, "Cost-efficiency of mixed 10-40-100gb/s networks and elastic optical networks," in Optical Fiber Communication Conference (OFC), Optical Society of America, 2011.

[5] M. Iyer, G. Rouskas, and R. Dutta, "A hierarchical model for multigranular optical networks," in International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, (BROADNETS), pp. 444–451, IEEE, 2008.

[6] Y. Wang and X. Cao, "Multi-granular optical switching: A classified overview for the past and future," IEEE Communications Surveys & Tutorials, no. 99, pp. 1–16, July 2011.

[7] P. Ji and Y. Aono, "Colorless and directionless multi-degree reconfigurable optical add/drop multiplexers," in Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), pp. 1–5, IEEE, 2010.

[8] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov, and T. Xia, "Flexible architectures for optical transport nodes and networks," IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 7, pp. 40–50, 2010.

Glosario

AoD: Architecture on Demand

BS: Broadcast and Select

SR: Spectrum Routing

SS: Switch and Select

MUX: Multiplexer

DEMUX: Demultiplexer

MEMS: Micro-electromechanical Systems

SSS: Spectrum Selective Switches

WSS: Wavelength Selective Switches

SSS_m: Numero de puertos del modulo SSS

w: Numero de longitudes de onda usada en el sistema

n: Numero de puertos de entrada del nodo.

$Conv_{LO}$: Numero de convertidores de longitud de onda.