

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAISO- CHILE



Balanceando el uso de bandas de frecuencia en redes ópticas multibanda.

Patrick Francois Guicharrousse Vargas

Como requisito para optar al grado de:
MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROFESOR GUÍA : Dr. Nicolas Jara Carvallo
PROFESOR CORREFERENTE : Dr. Ricardo Olivares Véliz
PROFESOR CORREFERENTE : Dr. Ariel Leiva López

Enero 2024



A mi familia . . .

Por tener la paciencia de ayudarme a terminar
este proceso y estar siempre conmigo

RESUMEN

Las redes ópticas multibanda son una solución sencilla y factible a la creciente demanda de tráfico de Internet, ya que evitan sustituir los cables de fibra óptica desplegados en la actualidad mediante el uso de bandas espectrales adicionales a la banda C. La selección de qué bandas espectrales utilizar para cada transmisión de datos añade una nueva dimensión a los típicos problemas de asignación de recursos que hay que resolver en la planificación de redes ópticas.

La solución estándar es abordarlos secuencialmente, utilizando otra banda espectral cuando la anterior no puede asignar la demanda de conexión. Sin embargo, una mejor distribución de las bandas espectrales puede conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

Este trabajo propone distribuir los recursos espectrales mediante un proceso de búsqueda de recursos en dos etapas. En la primera etapa, se restringe el uso de las bandas para evitar la sobrecarga mediante un umbral. Si no se encuentran recursos en la primera etapa, se genera una segunda búsqueda de recursos eliminando el umbral. En cada etapa, la búsqueda de disponibilidad se realiza secuencialmente a lo largo de las bandas.

En este trabajo se propone modificar el orden de búsqueda de las bandas espectrales con el objetivo de disminuir la probabilidad de bloqueo al aprovechar las características y limitaciones físicas de las bandas disponibles. Los resultados muestran que la propuesta obtiene una probabilidad de bloqueo menor que los algoritmos propuestos en la literatura sin aumentar significativamente la complejidad computacional.

Palabras clave Bandas espectrales, Redes ópticas multibanda, Probabilidad de bloqueo, Simulación

ABSTRACT

Multiband optical networks are a straightforward and feasible solution to the growing Internet traffic demands, avoiding replacing currently deployed fiber optic cables by using additional spectrum bands than C-band. The selection of which spectrum bands to use for each data transmission adds a new dimension to the typical resource allocation problems to be solved in planning optical networks.

The standard solution is to tackle them sequentially, using another spectral band when the previous one cannot allocate the connection demand. However, a better distribution of the spectral bands can achieve a better use of the available resources.

This paper proposes to allocate spectral resources through a two-stage resource search process. In the first stage, the use of bands is restricted to avoid overload by a threshold. If no resources are found in the first stage, a second resource search is generated by removing the threshold. In each stage, the availability search is performed sequentially along the bands.

In this work we propose to modify the search order of the spectral bands with the objective of decreasing the blocking probability by taking advantage of the physical characteristics and limitations of the available bands. The results show that the proposal obtains a lower blocking probability than the algorithms proposed in the literature without significantly increasing the computational complexity.

Keywords. Spectrum bands, Multiband optical networks, Blocking probability, Simulation

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Estado del arte	4
3. Solución propuesta	9
3.1. Algoritmo propuesto: Criterio de modulación	12
3.2. Algoritmo propuesto: umbral α	14
3.3. Algoritmo propuesto: Orden de banda	21
4. Simulación del Experimento	23
4.1. Configuración de las simulaciones	24
4.2. Simulación red NSFNet	28
4.2.1. Criterio de selección de Camino	29
4.2.2. Resultados de simulación: umbral α constante	34
4.2.3. Resultados de simulación: umbral ρ constante	36
4.2.4. Distribución de los resultados NSFnet	38
4.2.4.1. Distribución de las solicitudes en las bandas espectrales, NSFnet	41
4.3. Simulación red UKNet	43
4.3.1. Criterio de selección de Camino	44
4.3.2. Resultados de simulación: umbral α constante	47
4.3.3. Resultados de simulación: umbral ρ constante	48
4.3.4. Distribución de los resultados UKNet	50
4.3.4.1. Distribución de las solicitudes en las bandas espectrales, UKNet	52
5. Conclusión	54
6. Anexo: Trabajos futuros	56

Índice de Figuras

3.1. Atenuación medida en fibras de sílice (línea continua) y límites teóricos (líneas discontinuas) dados por la dispersión de Rayleigh en la región de longitud de onda corta y por vibraciones moleculares (absorción infrarroja) en la región espectral infrarroja.	10
3.2. Representación gráfica de la Tabla 3.3. Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km]	14
3.3. Algoritmo propuesto α	15
3.4. Procedimiento de asignación del nivel de modulación y del espectro: primera búsqueda. En la ecuación α se encuentra en porcentaje	17
3.5. Procedimiento de asignación del nivel de modulación y del espectro: segunda búsqueda	17
3.6. a) Efecto del umbral α , b) $\alpha=0$, c) $\alpha=100$, d) $\alpha=60$, e) Uso del espectro	20
4.1. Topología de red de fibra óptica NSFNet	28
4.2. Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red NSFNet, Path 0.	31
4.3. Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km].	31
4.4. Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red NSFNet, Path 1.	32
4.5. Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km].	32
4.6. Probabilidad de bloqueo de la red NSFNet al utilizar el algoritmo de Sambo con "Path"0 y "Path"1	33
4.7. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 0$ [%].	35
4.8. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 20$ [%].	35
4.9. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 40$ [%].	35
4.10. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 60$ [%].	35
4.11. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 80$ [%].	36
4.12. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 100$ [%].	36
4.13. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 100$ [Erlang]	37
4.14. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 1000$ [Erlang]	37
4.15. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 2000$ [Erlang]	37
4.16. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 3000$ [Erlang]	37
4.17. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 4000$ [Erlang]	37
4.18. Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 5000$ [Erlang]	37
4.19. Diferencia porcentual máxima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α para diferentes decisiones de rutas para NSFNet	38
4.20. Diferencia porcentual mínima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α para diferentes decisiones de rutas para NSFNet	38
4.21. Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la mejor configuración de orden de búsqueda de banda M_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red NSFNet.	42
4.22. Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la peor configuración de orden de búsqueda de banda m_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red NSFNet.	42
4.23. Topología de red de fibra óptica UKnet	43

4.24. Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red UKNet, Path 0. 46

4.25. Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km]. 46

4.26. Probabilidad de bloqueo de la red UKNet al utilizar el algoritmo de Sambo con "Path"0 y "Path"1. 46

4.27. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 0$ [%] 47

4.28. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 20$ [%] 47

4.29. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 40$ [%] 48

4.30. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 60$ [%] 48

4.31. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 80$ [%] 48

4.32. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 100$ [%] 48

4.33. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 100$ [Erlang] 49

4.34. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 1000$ [Erlang] 49

4.35. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 2000$ [Erlang] 49

4.36. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 3000$ [Erlang] 49

4.37. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 4000$ [Erlang] 49

4.38. Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 5000$ [Erlang] 49

4.39. Diferencia porcentual máxima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α [%] para diferentes decisiones de rutas para UKNet 50

4.40. Diferencia porcentual mínima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α [%] para diferentes decisiones de rutas para UKNet 50

4.41. Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la mejor configuración de orden de búsqueda de banda M_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red UKNet. 53

4.42. Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la peor configuración de orden de búsqueda de banda m_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red UKNet. 53

6.1. Mapa de calor Referencia 58

6.2. Mapa de calor M_α 58

6.3. Mapa de calor m_α 58

Índice de Tablas

3.1. Rango en [nm] de las bandas espectrales en una fibra de sílice	10
3.2. Capacidad de cada banda óptica en términos de ancho de banda espectral (BW) y unidades de ranuras de frecuencia (Slots).	11
3.3. Alcance máximo alcanzable (MAR) en un número de tramos (100 km cada uno) para sus respectivas bandas disponibles (C, L, S, y E), y formato de modulación, para un valor de BER_{th} igual a $4,7 \cdot 10^{-3}$	13
3.4. Ancho de banda disponible en cada banda utilizando un umbral α igual a 40%.	18
4.1. Criterios de configuración para las simulaciones	27
4.2. Criterios de rutas de conexión entre nodos	29
4.3. Resultados de simulación que muestran el mejor orden de búsqueda de banda y el umbral α [%] obtenido, utilizando "Path"0 en diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.	40
4.4. Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la probabilidad de bloqueo más baja M_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.	41
4.5. Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la mayor probabilidad de bloqueo m_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.	42
4.6. Resultados de simulación que muestran el mejor orden de búsqueda de banda y el umbral α [%] obtenido, utilizando "Path"0 en diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.	51
4.7. Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la probabilidad de bloqueo más baja M_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.	52
4.8. Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la mayor probabilidad de bloqueo m_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.	53
6.1. Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que se utiliza como referencia, la probabilidad de bloqueo: Orden de banda CLSE-CLSE, $\alpha = 100$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]	57
6.2. Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que maximiza la probabilidad de bloqueo: Orden de banda ESLC-CLSE, $\alpha = 40$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]	57
6.3. Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que minimiza la probabilidad de bloqueo: Orden de banda LSCE-ECSL, $\alpha = 10$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]	57

1 | Introducción

En todo sistema de comunicaciones el objetivo siempre es que el mensaje transmitido pueda ser recibido y comprendido por el receptor. Una vez que se cumple el objetivo principal de establecer la conexión entre el transmisor y receptor, se busca que esta conexión se mantenga al aumentar la distancia entre ambos usuarios, aumentar el número de usuarios y aumentar la velocidad del mensaje transmitido, entre otros parámetros a optimizar. Las comunicaciones, se pueden dividir en categorías: comunicaciones inalámbricas, utilizando antenas y satélites para establecer zonas de conexión para múltiples usuarios, y comunicaciones alámbricas, utilizando líneas de transmisión o fibra óptica que conecten varios nodos y de esa manera obtener varias arquitecturas de redes de comunicaciones.

La implementación de un sistema de comunicaciones de fibra óptica aporta un gran beneficio a la sociedad y las empresas de servicio de internet al aumentar significativamente la velocidad de transmisión de la información en comparación con los sistemas de comunicaciones alámbricos. Además, al ser un medio aislado no sufre interferencias asociados al medio ambiente como ocurre en sistemas inalámbricos. Sin embargo, está limitado por las características lineales y no lineales que pueda presentar la fibra. Se considera que el mayor beneficio de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica es la velocidad de transmisión y el gran ancho de banda disponible para transmitir.

Uno de los principales retos a los que se enfrentan los sistemas de comunicaciones por fibra óptica es el aumento de la demanda de tráfico de Internet. Este incremento obliga a las redes actuales a satisfacer eficientemente las demandas de los interesados [24]. Esta situación ha generado la necesidad de evolucionar la forma en que se transmite la información a través de estas arquitecturas [14].

En la actualidad, existen varias estrategias para aumentar los recursos de la red. Por ejemplo, las técnicas más estudiadas son modificar los sistemas de modulación para mitigar diversos efectos no lineales del enlace [2], instalar nuevos cables de fibra óptica multinúcleo para multiplicar el canal de comunicaciones [7], y aprovechar las características espectrales de los canales de comunicaciones para transmitir cosechando diferentes bandas de frecuencia [9].

Considerando todas las estrategias encontradas en la literatura, la instalación de cables de fibra óptica multinúcleo es la solución más sencilla para mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas

[9]. Aunque esta solución presenta los beneficios técnicos más significativos, también es la estrategia que presenta una menor viabilidad; dados los costes económicos asociados a una nueva instalación y el tiempo necesario para la implantación de la nueva fibra. Aunque es necesario instalar estos cables multinúcleo, antes se pueden abordar otras soluciones.

El problema del aumento de la carga de tráfico también puede abordarse sin instalar nuevos cables de fibra. Una de las estrategias es el uso de bandas de frecuencia distintas de la actualmente utilizada banda C, lo que se denomina multiplexación por división de banda (BDM). Esta opción multibanda se considera una de las más factibles [10] ya que utiliza la infraestructura óptica desplegada, actualizando los sistemas de transceptores y repetidores para que sean compatibles con esta nueva transmisión multibanda.

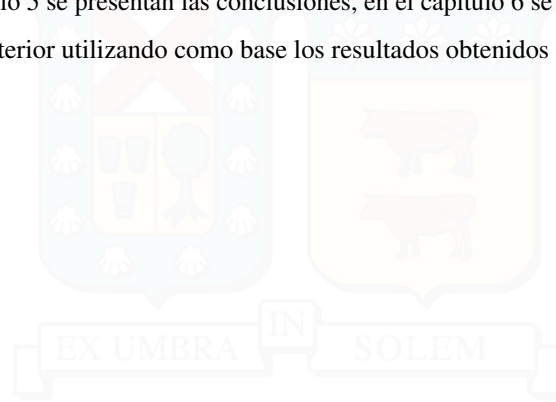
Uno de los retos que surgen de forma natural al aplicar arquitecturas multibanda es el problema de la asignación de los recursos necesarios para que se produzcan las comunicaciones. En las Redes Ópticas Elásticas (EON) [12] estándar, los operadores de internet deben establecer para cada conexión de red una ruta, decidir el formato de modulación más adecuado para esa ruta y qué porción del espectro se asignará en cada una de las rutas de los enlaces. En conjunto, estos problemas se conocen en la literatura como problemas (Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation) [5, 3]. El contexto multibanda añade una nueva dimensión a este problema, incluyendo la decisión de una banda apropiada para cada comunicación, considerando las restricciones intrínsecas que tiene cada banda espectral. El conjunto de estos problemas se conoce como RBMLSA (Routing, Band, Modulation Level, and Spectrum Allocation).

Se han estudiado los problemas RBMLSA en fibra óptica, aumentando la eficiencia de las comunicaciones y optimizando el uso de los recursos de la red [6, 28, 4, 13, 20, 18]. Cada una de estas soluciones tiene un elevado coste computacional, lo que puede implicar problemas en su uso práctico. Además, se considera que se desaprovechan los recursos que surgen al aumentar la banda espectral, ya que las peticiones de la mayoría de las estrategias estudiadas eligen las bandas de frecuencia de forma secuencial, comenzando por la Banda C, por lo que finalmente utilizan la misma banda en la mayoría de las transmisiones. En general, cada una de las soluciones presenta varias ventajas e inconvenientes. En este sentido, no sólo deben considerarse las ventajas técnicas de la solución propuesta, sino también la viabilidad, el tiempo, el coste computacional y económico asociados a dicha solución. Esta tesis presenta una solución factible que tiene en cuenta los cinco aspectos mencionados.

Este trabajo propone una nueva estrategia para mejorar la distribución del uso de bandas en la red, considerando la disponibilidad de bandas espectrales C, L, S y E. La solución modifica la propuesta [18] añadiendo una nueva variable umbral, y modificando el orden de búsqueda de las bandas espectrales para que el resultado obtenido tenga una menor probabilidad de bloqueo, evitando aumentar el coste computacional del sistema. Se modificó la ejecución del modelo de Ruido Gaussiano utilizando la tabla del peor escenario publicada [15], obteniendo la máxima distancia alcanzable y cantidad de FSU para todas las combinaciones posibles de petición de bit-rate y formato de modulación disponible. Se estudiaron varias combinaciones de

valores de umbral y orden de búsqueda de banda espectral y se ofrece la mejor solución entre ellas.

Esta tesis se compone por los siguientes capítulos. En el capítulo 2 se describe el estado del arte de las soluciones de asignación de recursos para contextos multibanda. En el capítulo 3 se presenta la estrategia de solución, el capítulo 4 ilustran los resultados de la propuesta de solución en comparación con los disponibles en la literatura, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, en el capítulo 6 se pueden encontrar propuestas para una investigación posterior utilizando como base los resultados obtenidos en esta tesis.



2 | Estado del arte

En las últimas décadas la tecnología asociada a las comunicaciones por fibra óptica ha evolucionado con el objetivo de aumentar la velocidad de transmisión de datos, para ello se han realizado mejoras asociadas al uso de diversos sistemas de amplificación óptica (EDFA)[25, 21], transmisión de múltiples portadoras por la misma fibra (WDM) [12] o el uso de formatos de modulación de alto nivel que permiten una mejor eficiencia espectral del uso del espectro [26]. De forma similar, durante los últimos años el aumento del número de usuarios en internet ha generado un aumento de tráfico de alrededor del 40 % anual y se estima que este número se duplica cada 2 o 3 años. Se debe tener en consideración que todos los sistemas de transmisión de datos tienen un límite teórico establecido por el teorema de Shannon-Hartley [19], el cual establece la máxima cantidad de datos digitales que se pueden transmitir en un canal de comunicaciones en presencia de ruido blanco. Considerando la tasa de aumento de tráfico a partir del número de usuarios, la velocidad de desarrollos tecnológicos asociados a la fibra óptica y teniendo presente lo establecido por el teorema de Shannon-Hartley se prevé que en los próximos años se produzca el fenómeno conocido como Capacity crunch (falta de capacidad)[24].

El capacity crunch ocurre cuando la demanda de recursos supera la capacidad soportada por la red. Este fenómeno no implica directamente el colapso de la red óptica, pero sí limita directamente la velocidad de transferencia de información y, si se considera el punto de vista social, genera problemas a los proveedores de servicios de internet al momento de realizar el cobro monetario del uso del sistema. En teoría el capacity crunch es una conclusión inevitable dado que llegará un momento en que la demanda de recursos de red supere a lo que esta puede ofrecer, pero en la actualidad los sistemas de comunicaciones de fibra óptica aún se encuentran lejos de llegar a un límite tecnológico que implique directamente el capacity crunch, ya que los sistemas de fibra óptica que se encuentran en uso comercial se consideran ineficientes desde un punto de vista tecnológico [16].

El artículo [16] prevé el capacity crunch y realiza una discusión sobre la necesidad de administrar de forma eficiente los recursos. En el momento de la publicación del artículo [16] las comunicaciones por fibra óptica se consideraban poco eficientes dado que se regían por una normativa restrictiva. Se debe tener en consideración que son los proveedores de internet los cuales deben cumplir la norma establecida por la ITU-T

(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization) [1] (normativa actual).

La normativa dada por la ITU-T consiste en tener una grilla espectral, donde cada proveedor tiene un ancho de banda con una capacidad fija para realizar todas sus conexiones. En la normativa ITU-T anterior el tamaño era equivalente a 50[GHz], por lo que no existían problemas al momento de transmitir una señal que requiera 10 [Gb/s] o 40[Gb/s], en este caso la aplicación de esta grilla se considera poco eficiente al dejar espacios vacíos en el espectro. El problema de esta normativa era cuando se requerían tasas de transmisión mayores a 50[GHz], por ejemplo de 400[Gb/s]. En estos casos el espectro es dividido en secciones de tamaño tal que se puedan transmitir de forma independiente por el espacio espectral disponible, siempre que cumplan con la normativa establecida. En estas situaciones el proceso de transmisión es el siguiente: primero divide el espectro que se busca enviar, luego, las secciones del espectro son transmitidas a través de la fibra y sus secciones se ajustan a los diversos espacios disponibles en la grilla espectral establecida por la normativa (no necesariamente adyacentes). Finalmente, el espectro es unido en el proceso de recepción. Existen diversos inconvenientes asociados a la transmisión de un espectro con un ancho de banda superior a lo establecido por la ITU-T, los problemas son principalmente asociados a los tiempos de retardo, las no linealidades de la red y complejidades asociadas al proceso de unión del espectro. Esta grilla espectral es fijada por la normativa y no cambia con respecto al tiempo por lo que a este sistema se le conoce como una red óptica inelástica.

En los últimos años se ha propuesto el uso de redes elásticas (EON) [12] para flexibilizar la asignación de espectros dentro de la fibra. En este tipo de redes el espectro se divide en slots de frecuencia denominados FSU (Frequency Slot Units) cada uno de 12.5[GHz], luego, los FSU se pueden agrupar para complementar el ancho de banda requerida por cada solicitud. Al utilizar redes elásticas los operadores deben seleccionar el enrutamiento dentro de la red, el formato de modulación y la asignación del espectro solicitado, esto problemas se denominan RMLSA (Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation) [5, 3].

En la actualidad la normativa ITU-T[1] considera que la grilla espectral puede establecer sus rangos desde 12.5 [GHz] a 100 [GHz], y ventanas de múltiplos enteros de 100[GHz], se debe recordar que este valor se mantiene fijo durante todo el proceso de comunicaciones. De manera similar, la normativa también permite redes elásticas con el objetivo de optimizar los anchos de banda para cumplir los requisitos de una tasa de bit en particular. En esta normativa el tamaño de cada slot es de 12.5 [GHz] y establece que cada slot debe ser múltiplo entre sí, en otras palabras no puede existir una superposición en el espectro debido a ubicación del slot.

La implementación de redes elásticas optimiza el uso del espectro disponible, pero al considerar el aumento de tráfico producto del incremento del número de usuarios y sus necesidades de servicio [24] es evidente que esta propuesta por sí misma se enfrentará a la falta de recursos espectrales.

En [5] presentan una solución a los problemas RMLSA dividiendo la búsqueda de asignación en dos etapas centrado en reducir el uso del espectro. En una primera etapa, utiliza un criterio que distribuye eficazmente las demandas en intervalos de FSU y en su última etapa realiza la asignación de espectro. En [3]

presentan una solución adaptativa al BER (Bit error rate) para resolver los problemas asociados a RMLSA para redes ópticas de área amplia con el objetivo de maximizar el número de solicitudes exitosas. Esta tesis siguió el paradigma presentado en [5] de realizar dos procesos de búsqueda y, dado que el objetivo de esta investigación es minimizar la probabilidad de bloqueo, utiliza los resultados que se obtuvieron en [3] los cuales maximiza el número de conexiones exitosas.

Actualmente la banda espectral más utilizada por las empresas de servicio de internet es la banda C, esta banda espectral trabaja en el rango de longitud de onda de entre 1530 a 1565 [nm], que corresponde al rango de amplificación de fibra dopada con erbio (EDFA) [25]. Considerando la necesidad de aumentar los recursos espectrales se han propuesto soluciones que utilizan las bandas adyacentes a la banda C, es decir la banda E de rango 1360 a 1460[nm], la banda S de rango 1460 a 1530[nm] y la banda L de rango 1565 a 1625 [nm] [12]. La inclusión de la banda espectral como parámetro a optimizar cambia el problema RMLSA a un problema RBMSLA (Routing, Band, Modulation Level, and Spectrum Allocation).

El aumento del número de bandas espectrales conlleva consigo un nuevo conjunto de retos y problemas asociados principalmente con la RBMLSA, las capacidades físicas de cada banda espectral, las características lineales y no lineales que pueden surgir, y la implementación de transmisores, receptores y amplificadores compatibles con estas bandas espectrales adicionales. En [6] el autor plantea que los desafíos tecnológicos que son necesarios para solucionar e implementar un sistema de fibra óptica multibanda. Esta tesis plantea que, a pesar de los desafíos técnicos que existen actualmente, es una solución viable implementar un sistema multibanda en las comunicaciones por fibra óptica.

Al trabajar en una red óptica elástica multibanda se presentan problemas asociados a RBMLSA, dada la gran cantidad de variables, la complejidad de establecer un modelo o algoritmo conlleva de igual forma un proceso muy complejo. En el servicio [28] se propone algoritmo que se prioriza las demandas en base a la distancia entre solicitudes de conexión y asignar el uso de la banda espectral en base preferentemente a ese criterio. En [4], proponen un enfoque heurístico para el aprovisionamiento dinámico de la red, donde proponen tres algoritmos que se consideran excelentes estrategias para afrontar diversos escenarios multibanda. En ambos casos se demuestra que es posible optimizar los recursos de la red con respecto al uso de una sola banda espectral, pero aun no utilizan todo el espectro disponible.

De igual manera, se han propuesto soluciones basadas en técnicas de aprendizaje automático para afrontar los problemas asociados a la asignación de recursos en arquitecturas BDM. En el caso de [13], se presenta una aproximación basada en técnicas de aprendizaje por refuerzo para la asignación de recursos en redes ópticas. En este caso se realizan pruebas en 4 escenarios de disponibilidad de redes y concluyeron Trust Region Policy Optimization (TRPO) es el agente con el mejor rendimiento. En [20], se basan en aprendizaje profundo utilizando una red Q profunda (DQN), disminuyendo la probabilidad de bloqueo. DQN es una variante del reinforcement learning, el cual es un tipo de aprendizaje automático en que el agente aprende a interactuar con su entorno con el objetivo de maximizar una recompensa. Ambos trabajos muestran que

existen enfoques basados en el aprendizaje de máquinas que buscan optimizar los parámetros de una red elástica multibanda. Sin embargo, el nivel técnico de entrada y que la complejidad de los modelos estén estrechamente ligados a la complejidad y dinámica de la red produce que sea una solución que implica riesgos para los proveedores de servicio al momento de implementar cualquiera de ellas a nivel industrial.

Cada una de las propuestas para solucionar los problemas asociados a RMLSA y RBMLSA presentan ventajas y desventajas tecnológicas y prácticas. La ventaja de cada uno de las soluciones propuestas es que efectivamente optimizan el parámetro que buscan minimizar o maximizar. Cada una de las soluciones presenta un nivel técnico de entrada considerado alto y, aunque a nivel de investigación se presenta como una ventaja, se considera una desventaja en la práctica dado que no es apropiado asumir la capacidad técnica del operador. Esta tesis tiene como objetivo presentar un algoritmo que sea capaz de reducir la probabilidad de bloqueo de la red y de forma simultánea que sea una solución que sea aplicable a nivel industrial, es decir que su nivel de entrada técnica sea bajo, su implementación sea rápida, su costo de ejecución y monetario sean bajos. Para cumplir con el objetivo del trabajo se logran rescatar técnicas utilizadas por otros autores.

Entre todas las propuestas de solución para RBSMLA estudiadas en esta tesis se concluye que el esquema presentado por [18], al cual denominare algoritmo de Sambo durante toda esta tesis, cumple con las condiciones de aplicabilidad industrial necesarias para utilizarlo como base para el algoritmo que se propondrá en este trabajo. En [18] los autores realizaron una simulación de un sistema multibanda, utilizando los escenarios de banda C+L, C+L+S, C+L+S+E y C+L+S+E+O, en dicha simulación los autores consideraron una red de transporte española con 30 nodos y 55 enlaces bidireccional [17]. Cada uno de los tramos entre nodos tiene una longitud de 80 [km] y supone que el proceso de llegadas de solicitud de conexión es de 200 [Gb/s]. El algoritmo de Sambo optimiza el bitrate, es decir que siempre transmite la información en el mayor orden de formato posible, en su caso era 16-QAM.

El algoritmo propuesto por los autores [18] es el siguiente:

- Seleccionan el camino por el cual se realizara la conexión.
- Se selecciona el formato de modulación de mayor orden.
- Se selecciona la banda (partiendo por la banda C).
- Se estima el GSNR del enlace.
- Se cuestiona si el valor del GSNR cumple con los criterios para que la conexión se pueda establecer utilizando una modulación de alto nivel
 - En caso de no cumplir el criterio del BER mínimo para la conexión intenta cambiar de banda espectral.
 - Si aun quedan bandas disponibles, entonces cambiara de banda y calculará nuevamente el GSNR.

- En caso de no tener bandas disponibles entonces intenta cambiar (bajar la complejidad) del formato de modulación.
 - ◊ Si es posible seleccionar otro formato de modulación entonces vuelve a seleccionar la banda.
 - ◊ Si no es posible seleccionar otro formato de modulación entonces la conexión se bloquea
- En caso de cumplir el criterio del BER entonces se cuenta si es posible asignar el espectro en la banda seleccionada.
 - Si no hay espacio en la banda, entonces vuelve a buscar otra banda espectral.
 - En caso de encontrar espacio en la banda, entonces la conexión se realiza.

Al finalizar este trabajo, los autores de [18] concluyeron que al utilizar la combinación de bandas C+L+S la velocidad de transmisión de datos logro aumentar hasta cuatro veces con respecto a la transmisión utilizando únicamente la banda C. De igual forma, concluyen que al utilizar la banda espectral E la velocidad aumenta aun más y que al utilizar dicha banda las capacidades de una red óptica aumentan significativamente. Por otro lado, se concluyó que la banda O no ofrece suficiente calidad de señal para redes de tamaño regional.

La principal ventaja del algoritmo de Sambo [18] es que funciona independientemente del número de bandas que tenga disponible la red. Esta ventaja permite su inmediata aplicación a nivel industrial. De forma simultánea, esta ventaja se transforma en una desventaja aparente en los casos donde se tienen a disposición las bandas espectrales [C,L,S,E], ya que a pesar de que el algoritmo funciona en este escenario no presenta el resultado óptimo para este caso.

3 | Solución propuesta

Esta tesis tiene como objetivo principal proponer una solución al problema RBSMLA, priorizando la disminución de la probabilidad de bloqueo a partir de un algoritmo que sea capaz de ser aplicado a nivel industrial en las empresas que presten servicio de internet a través de la red de fibra óptica. La solución propuesta en este documento presenta un bajo nivel de entrada, un rápida implementación practica y un bajo costo computacional.

Este trabajo utiliza como referencia el algoritmo propuesto en [18], al cual se le nombra como algoritmo de Sambo en este documento. La principal razón para utilizar dicha referencia es su estructura de búsqueda de bandas espectrales y su proyección para ser aplicado a nivel industrial, tal como se discute en el capítulo 2. El algoritmo de Sambo presenta es esquema flexible, lo cual permite que a la red se le puedan agregar nuevas bandas espectrales. Sin embargo, la lógica subyacente de este algoritmo es que para asignar una solicitud a una nueva banda espectral, la banda espectral debe estar completamente o el tamaño de la solicitud es superior al tamaño disponible de la banda en ese instante.

De manera similar, la mayor parte de los algoritmos discutidos en el capítulo 2 presentan diversas lógicas de trabajo para solucionar los problemas de RBSMLA. La conclusión de los estudios es que al aumentar el ancho de banda disponible en el canal de comunicaciones disminuye la probabilidad de bloqueo de la red. Existen dos formas para aumentar la capacidad de ancho de banda en una red de fibra óptica: La primera es aumentar el numero de líneas de fibra entre los nodos y la segunda es hacer uso de otras bandas espectrales [9].

La industria de servicios de internet se encuentra en una encrucijada con respecto a los problemas asociados al capacity crunch. La solución ideal es que se puedan instalar un número muy alto de lineal entre todos los nodos para tener canales de comunicaciones dedicados, lamentablemente existen diversos factores que impiden a la industria implementar esta solución en todos los escenarios: por ejemplo el costo económico y la complejidad de instalación para una nueva línea submarina. Por lo tanto, la solución practica que debe implementar la industria de internet para disminuir la latencia de la red es utilizar todo el espectro disponible a nivel comercial. Por lo tanto, al trabajar en un escenario en donde se tenga a disposición todo el ancho de banda disponible para uso comercial el problema de asignación de banda

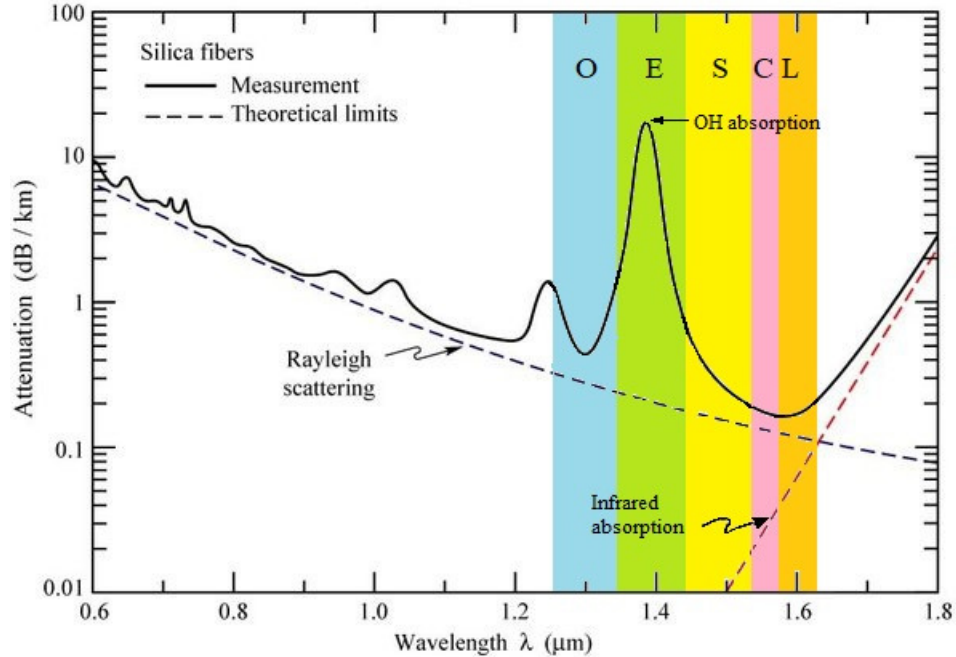


Figura 3.1: Atenuación medida en fibras de sílice (línea continua) y límites teóricos (líneas discontinuas) dados por la dispersión de Rayleigh en la región de longitud de onda corta y por vibraciones moleculares (absorción infrarroja) en la región espectral infrarroja.

En la figura 3.1 muestra una curva de atenuación típica para una fibra óptica de sílice [21] [25], la cual es la fibra que se utiliza normalmente en la red de comunicaciones. En la Tabla 3.1 se aprecian los rangos de las bandas espectrales disponibles para la transmisión de información por fibra óptica.

Tabla 3.1: Rango en [nm] de las bandas espectrales en una fibra de sílice

Banda espectral	λ_{Start} [nm]	λ_{Stop} [nm]
O	1260	1360
E	1360	1460
S	1460	1530
C	1530	1565
L	1565	1625

Sin embargo, tal como se presenta en los resultados obtenidos en [18] y los estudios realizados por [27], tecnología necesaria para que la banda espectral **O** sea aplicable a nivel comercial no se encuentra madura, por lo que se para efectos prácticos se obviara su presencia.

El algoritmo propuesto en este trabajo asume que se tiene a disposición las bandas espectrales [**C,L,S,E**], por lo que se asume que la tecnología de transmisión de información de estas bandas espectrales se encuentra madura para su uso a nivel industrial.

Al observar la Tabla 3.1 se puede apreciar que cada una de las bandas espectrales disponibles presenta diferentes niveles de atenuación con respecto a la distancia, siendo la banda **E** especialmente limitada por este factor. De manera similar, la banda espectral **C** presenta características bastante lineales con respecto a su nivel de atenuación con respecto a su longitud de onda. A nivel industrial las comunicaciones por fibra óptica se realizan principalmente a través de la banda **C**, y en algunos casos, se utiliza junto con la banda **L** [23]. El uso industrial de las bandas **S** y **E** aún no se encuentra implementado, solo se utiliza en redes de menor envergadura y en laboratorios para su estudio [11, 29, 27].

Dado que se está trabajando con Redes Ópticas Elásticas Multibanda (MB-EON) es posible dividir las bandas espectrales en ranuras de frecuencia (FSU) de 12,5 [GHz] [4]. De esta manera, las bandas disponibles se pueden ordenar por capacidad de menor a mayor en cuanto a disponibilidad de FSU. La banda **C** dispone de 344 FSU, la banda **L** de 480 FSU, la banda **S** de 760 FSU y la banda **E** de 1136 FSU. La Tabla 3.2 enumera la capacidad espectral total considerada para cada banda, como en [4].

Tabla 3.2: Capacidad de cada banda óptica en términos de ancho de banda espectral (BW) y unidades de ranuras de frecuencia (Slots).

Band	Frequency Range [THz]	BW [THz]	Slots (BW/12.5 [GHz])
L	185.7 - 191.7	6	480
C	191.7 - 196	4.3	344
S	196 - 205.5	9.5	760
E	205.5 - 219.7	14.2	1136
Total	185.7 - 219.7	34	2720

Esta tesis propone un algoritmo que disminuya la probabilidad de bloqueo de la red al considerar que se tiene a disposición todo el espectro disponible, es decir que se tiene acceso y disposición a las espectrales **C**, **L**, **S**, y **E**. Para lograr este propósito se el algoritmo propuesto debe tener en consideración tres espectros principales:

- Criterios de modulación del mensaje transmitido
- Criterio de distribución de las solicitudes en el espectro disponible
- Criterio de búsqueda de bandas espectrales para la asignación de solicitudes.

Estos tres criterios son explicados en este capítulo e implementados en el algoritmo final. En el capítulo 4 se presentarán los resultados de aplicar el algoritmo a redes de grandes dimensiones.

3.1. Algoritmo propuesto: Criterio de modulación

En general todos los sistemas de comunicaciones presentan el mismo objetivo: el mensaje transmitido sea recibido e interpretado correctamente por el receptor. De forma similar, todos los sistemas de comunicaciones realizan desplazamientos en frecuencia para facilitar la transmisión de información, el proceso de trasladar un mensaje desde su rango de frecuencia original a una alta frecuencia se le denomina modulación y el proceso contrario se le conoce como demodulación.

El uso de fibra óptica como canal de comunicación presenta la ventaja con respecto a la velocidad de transmisión de información con respecto a un canal inalámbrico. Además, al ser un canal aislado no presenta perturbaciones por otras señales en el medio, como lo son en el caso de inalámbrica. Sin embargo, dadas las características no lineales de la fibra óptica, la señal al ser transmitida presenta diversas deformaciones producto de los amplificadores ópticos.

El fenómeno no lineal mencionado es para ejemplificar que a pesar de que las redes de fibra óptica presentan muchas ventajas respecto a la velocidad de transmisión de la señal, también presentan diversos efectos no lineales los cuales deben ser mitigados para que el mensaje recibido pueda ser correctamente comprendido.

Es necesario comprender que la velocidad de transmisión de información está directamente relacionado al formato de modulación utilizado, mientras mayor sea el formato de modulación se enviara una mayor cantidad de símbolos en el mismo tiempo que un formato de modulación de menor orden. Por lo tanto es muy habitual en la industria de servicio optimizar la velocidad de transmisión, por lo que indirectamente priorizan transmitir utilizando el formato de modulación de mayor orden.

En la investigación de Sambo se [18] priorizan la velocidad de transmisión sobre la asignación en una banda espectral específica, lo cual le da la ventaja competitiva de que siempre se trabajará a la mayor tasa de bit. En su proceso de búsqueda estiman en GSNR de cada conexión para determinar si es posible asignar la solicitud con las condiciones solicitadas, este proceso de cálculo es bastante complejo a nivel computacional. De forma simultánea, desaprovecha la capacidad espectral que se tiene disponible y presenta como premisa principal que la conexión se realizará.

En este trabajo se busca que las conexiones entre los nodos de inicio y término de una solicitud de conexión sea lo más probable posible, por lo que se prioriza asignar la banda espectral antes de determinar la velocidad de transmisión en dicha banda. Para evitar los efectos no lineales que se presentan las comunicaciones por fibra óptica en las simulaciones se utilizaron los valores calculados en la investigación de F. Calderón [4], los cuales consideran un BER_{th} igual a $4,7 \cdot 10^{-3}$, y un ancho espectral de slot de 12,5 GHz. Los formatos de modulación considerados en esta tesis son los siguientes:

- Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK)

- Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)
- Modulación de amplitud en cuadratura Λ (Λ -QAM), donde Λ toma los valores 8, 16, 32 y 64

El formato de modulación que selecciona la simulación en entorno es el más eficiente, con un alcance óptico igual o superior al trayecto seleccionado por el agente. El alcance máximo alcanzable, expresado en número de tramos (1 tramo = 100 km) para cada formato de modulación para los distintos escenarios multibanda, se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Alcance máximo alcanzable (MAR) en un número de tramos (100 km cada uno) para sus respectivas bandas disponibles (C, L, S, y E), y formato de modulación, para un valor de BER_{th} igual a $4,7 \cdot 10^{-3}$.

Modulación	Net Bit-rate [Gb/s]	MAR [spans]			
		C	L	S	E
BPSK	23	130	144	102	31
QPSK	46	65	72	51	15
8-QAM	69	35	39	29	9
16-QAM	92	17	19	14	4
32-QAM	115	8	9	7	2
64-QAM	140	4	5	3	1
256-QAM	186	1	1	0	0

En la figura 3.2 se puede apreciar una representación gráfica de los límites presentados en la Tabla 3.3. La interpretación de la Tabla 3.3 es la siguiente: Si busco utilizar la banda **E** con un formato de modulación **BPSK** la distancia máxima que puede tener la conexión es de $100[\text{km}] \cdot 31 = 3100[\text{km}]$. En cambio, si el formato de modulación es **16-QAM** la distancia máxima que puede tener la conexión es de $100[\text{km}] \cdot 4 = 400[\text{km}]$.

Se puede interpretar la figura 3.2 de la siguiente manera: Si la distancia entre dos los nodos de inicio y termino es de $3500[\text{km}]$ entonces es posible realizar la comunicación por las bandas **[C,L,S]** pero no por la banda **E**. El formato de modulación de mayor orden que se puede implementar es **8-QAM** cuando se utilizan las bandas **[C,L]**, pero cuando se utiliza la banda **[S]** solo se puede implementar el formato de modulación **QPSK**. Si la distancia entre los nodos es mayor a $11000[\text{km}]$ la conexión solo es posible a por las bandas espectrales **[C,L]** utilizando un formato de modulación **BPSK**. En cambio, si la distancia entre los dos puntos es $1500[\text{km}]$ es posible realizar la conexión por cualquiera de las cuatro bandas espectrales disponibles.

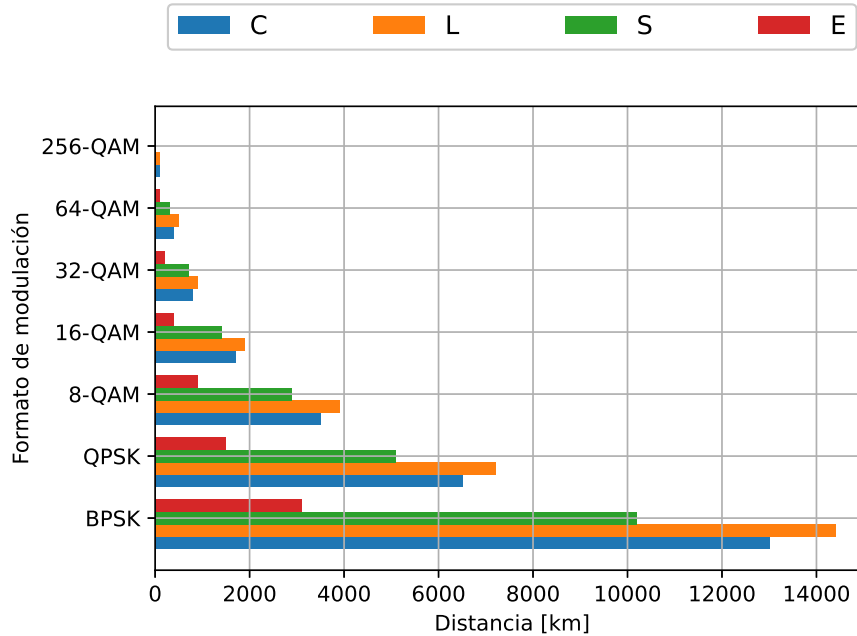


Figura 3.2: Representación gráfica de la Tabla 3.3. Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km]

3.2. Algoritmo propuesto: umbral α

Este trabajo pretende disminuir la probabilidad de bloqueo utilizando todo el espectro disponible de forma más eficiente. También se busca optimizar los parámetros técnicos, la viabilidad, el tiempo de ejecución, los costes computacionales y económicos asociados a la estrategia propuesta. En este sentido, la utilización de un umbral es la forma más sencilla de distribuir la información a través de las bandas disponibles. En este trabajo, esta propuesta se denota como umbral α , que se considera un umbral duro.

La figura 3.3 muestra el esquema general del algoritmo propuesto. El primer paso es elegir el camino que seguirá la petición. Generalmente, se utilizará la conexión más corta entre dos nodos. A continuación, se comienza con la búsqueda secuencial de una banda espectral para transmitir la petición de comunicación. Considerando que se tienen disponibles las bandas espectrales **C**, **L**, **S** y **E**. Una vez seleccionada una banda espectral, se debe seleccionar el formato de modulación, y determinar si, bajo las condiciones del umbral α , es posible la asignación del espectro; en caso contrario, se realiza la misma búsqueda en la siguiente banda espectral disponible. La búsqueda de banda se realiza en cada banda disponible (4 veces) considerando el espacio delimitado por el umbral α . Si esta búsqueda falla, la búsqueda se realiza de nuevo en todas las bandas disponibles sin el umbral α . Si el espectro no puede asignarse en ambas búsquedas, la conexión no puede asignarse y, por tanto, se bloquea.

La figura 3.3 ilustra el proceso de asignación de recursos, que depende de los resultados del bloque

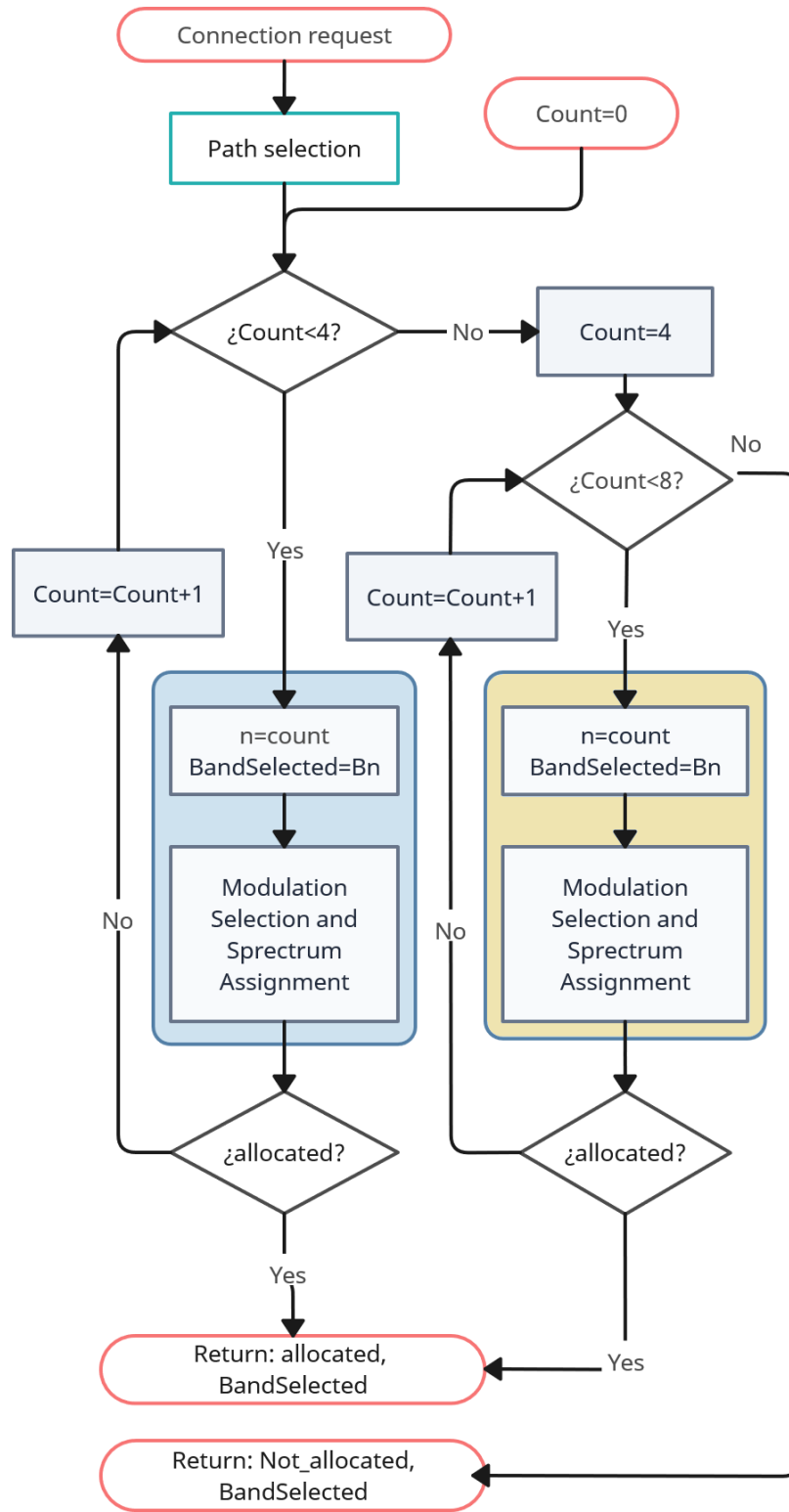


Figura 3.3: Algoritmo propuesto α

"Selección de modulación y asignación de espectro". Nótese que, ambos bloques de la figura no son exactamente iguales. El bloque de la izquierda, figura 3.4, muestra el primer proceso de búsqueda de las primeras 4 bandas limitadas al valor del umbral α , y el bloque de la derecha, figura 3.5, muestra el segundo proceso de búsqueda de 4 bandas sin restricciones de espacio. Los diagramas que se aprecian en las figuras 3.4 y 3.5 pueden explicarse de la siguiente manera:

- Sea $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ el orden de búsqueda de las cuatro primeras bandas a considerar, y $[B_4, B_5, B_6, B_7]$ el orden de búsqueda de las cuatro últimas bandas. Tenga en cuenta que, B_0 a B_7 puede ser cualquier banda disponible entre C, L, S o E .
- Para una solicitud de transmisión determinada, el proceso de selección de banda comienza estableciendo la variable $BandS\ elected = B_0$. Obsérvese que B_0 es la primera banda espectral seleccionada por defecto.
- El formato de modulación comienza con el orden más alto disponible considerando el máximo alcanzable (MAR) en la Tabla 3.3.
- Comprueba si hay espacio disponible en la banda seleccionada $BandS\ elected$ mediante la ecuación (3.1):

$$\widehat{BW}_b + bw \leq BW_b(1 - \alpha), \quad (3.1)$$

donde BW_b es la capacidad total disponible en la banda B medida en FSU, bw es el tamaño de la solicitud de conexión en FSU, \widehat{BW}_b representa el estado de ocupación actual de la banda BW_b y α es el umbral duro propuesto en este trabajo. La ecuación (3.1) tiene la siguiente interpretación:

- Si la capacidad actual de la banda en FSU más el tamaño de la solicitud en FSU es menor o igual que la capacidad total disponible, la asignación puede realizarse en la banda B . En caso contrario, hay que cambiar de banda.
- Si se acepta, sigue al paso siguiente utilizando la banda B .
- El proceso de asignación de espectro se ejecuta utilizando para ello el algoritmo First-Fit tal como se utilizo en el algoritmo de referencia [18].
- Si no se encuentra espacio espectral suficiente, hay que intentarlo en la siguiente banda disponible.

En el caso de que se determine que no es posible asignar la petición en la primera búsqueda que está limitada por $BW_b(1 - \alpha)$, figura 3.4, es decir, no fue posible realizar la conexión en el espacio espectral disponible en las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$. Se vuelve a realizar la búsqueda, pero esta vez ya no se limita al espacio disponible por $BW_b(1 - \alpha)$, figura 3.5, y realiza la búsqueda en las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$.

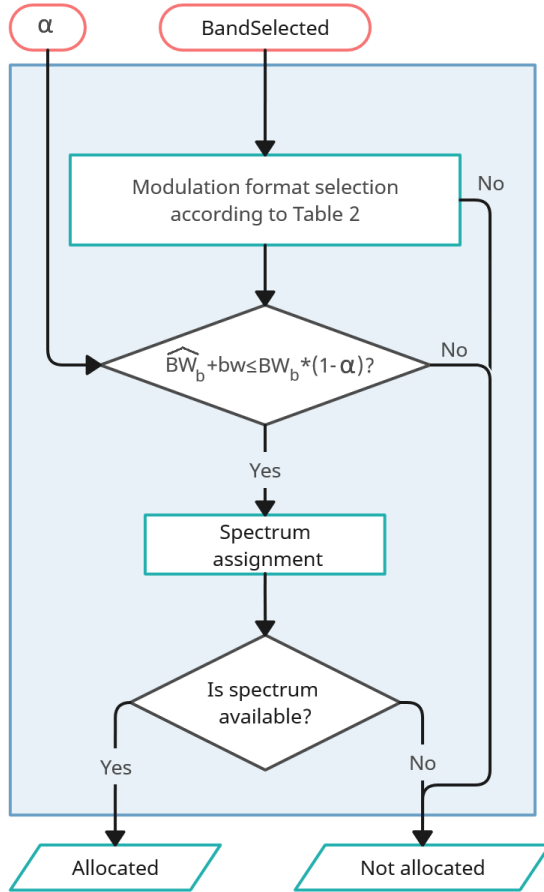


Figura 3.4: Procedimiento de asignación del nivel de modulación y del espectro: primera búsqueda. En la ecuación α se encuentra en porcentaje

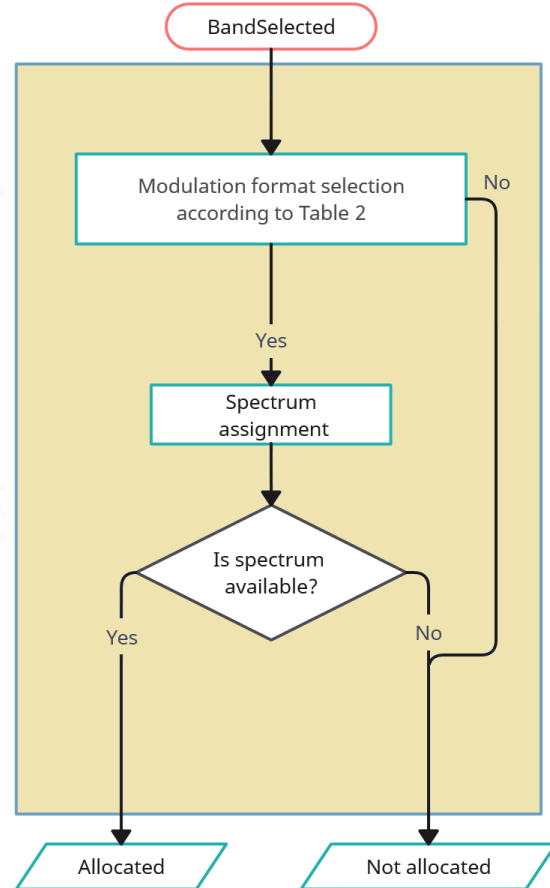


Figura 3.5: Procedimiento de asignación del nivel de modulación y del espectro: segunda búsqueda

Se Ejemplifica el algoritmo α propuesto con el siguiente escenario:

- Se asume que se dispone de las cuatro bandas espectrales [C,L,S,E].
- Según el algoritmo, la primera búsqueda se realiza en las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ y la segunda en las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$.
- La primera búsqueda de banda se realiza en el orden [C, L, S, E], y la segunda búsqueda en el orden [C, L, S, E].
- Se considera un umbral $\alpha = 40\%$.

La Tabla 3.4 muestra el estado de las FSU disponibles para el escenario del ejemplo. Obsérvese que la capacidad disponible de cada banda en FSU varía dependiendo del valor del umbral α . Se debe recordar que en el algoritmo propuesto en este trabajo la primera búsqueda de recursos disponibles se realiza siguiendo el orden de bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ limitado al umbral α , y la segunda búsqueda de bandas utilizando $[B_4, B_5, B_6, B_7]$ el umbral que libera permitiendo el uso de toda la capacidad de la banda.

Tabla 3.4: Ancho de banda disponible en cada banda utilizando un umbral α igual a 40 %.

Banda	Criterio	FSU
$B_0 = C$	$BW_b(1-\alpha)$	207
$B_1 = L$	$BW_b(1-\alpha)$	288
$B_2 = S$	$BW_b(1-\alpha)$	456
$B_3 = E$	$BW_b(1-\alpha)$	682
$B_4 = C$	BW_b	344
$B_5 = L$	BW_b	480
$B_6 = S$	BW_b	760
$B_7 = E$	BW_b	1136

Consideraré como ejemplo una solicitud de conexión con una demanda igual a 208 FSU. Además, hasta el momento solo se ha utilizado la banda B_0 para realizar cualquier conexión, es decir que las bandas espectrales B_1 a B_7 están completamente disponibles. En primer lugar, el método propuesto inicia la búsqueda en la banda B_0 , es decir, en la Banda C. La banda C está limitada por el umbral α . Por lo tanto, dado que $B_0 = 207$ la demanda de FSU es mayor que el espectro disponible (ver Tabla 3.4), entonces no se puede realizar la conexión en la Banda B_0 y se debe continuar la búsqueda en la banda B_1 , correspondiente a la Banda L. Como el tamaño disponible de la Banda B_1 es igual a 288, entonces la petición se podría realizar por la Banda L, ejecutando el procedimiento de Modulación y Asignación de Espectro. Sin embargo, si ya se habían realizado conexiones por la Banda B_1 se debe determinar si hay suficientes slots contiguos dentro de la banda para asignar la petición, en caso de no encontrar suficientes FSU contiguos entonces se reanudará la búsqueda en la Banda B_2 .

Si se ejecuta el algoritmo y se determina que no es posible encontrar disponibilidad porcentual de slots en las bandas de frecuencia o no hay espacio contiguo disponible para asignar la conexión en las bandas espectrales $[B_0, B_1, B_2, B_3]$, entonces no se logró realizar las conexiones en la primera búsqueda. La segunda búsqueda utiliza las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$, sin la limitación del umbral α (ver Tabla 3.4), comenzando por la banda B_4 considerando todo el espectro disponible. La búsqueda continúa hasta encontrar el conjunto de ranuras de frecuencia contiguas, de lo contrario, se considerará bloqueada.

En la figura 3.6 se muestran varios ejemplos de aplicación del algoritmo propuesto. En este ejemplo, sólo se analizará la banda C, es decir, cómo se distribuyen las peticiones en las bandas B_0 y B_4 .

- En la figura 3.6 a), se hace explícito el orden de búsqueda de las bandas, es decir que el proceso siempre realiza la primera búsqueda en las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ y la segunda búsqueda en las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$. Recordar que la diferencia entre ambas radica en la aplicación del umbral α
- En la figura 3.6 b), muestra un ejemplo donde el umbral α es igual a 0, por lo que la capacidad espectral disponible de cada banda es $B_0 = 344$ FSU y $B_4 = 0$ FSU, eso implica que todas las solicitudes se realizan en la primera búsqueda. En este ejemplo es evidente que en caso de que una solicitud no pueda ser asignada en la banda B_3 entonces la solicitud no podrá ser asignada ya que $B_4 = 0$.

- En la figura 3.6 c), muestra el ejemplo donde el umbral α es igual a 100, por lo que $B_0 = 0$ FSU y $B_4 = 344$ FSU. En este caso no se encuentre ningún espacio en la primera búsqueda, y se realicen todas las conexiones en la segunda búsqueda. En caso de no encontrar espacio disponible en la banda B_7 entonces la solicitud no podrá ser asignada.
- En la figura 3.6 d), muestra el ejemplo donde el umbral α es igual a 60, por lo que $B_0 = 137$ FSU y $B_4 = 207$ FSU. Si el tamaño de la petición es inferior a 137 FSU, se puede ser asignada en la primera búsqueda, en caso de tener un tamaño superior a 137 FSU o no lo encontrar slots contiguos entonces se buscara en la banda B_1 . En caso de no encontrar espacio en las bandas B_1 , B_2 y B_3 entonces pasara a la segunda búsqueda y la solicitud podrá ser asignada en la banda B_4 . Este caso demuestra la idea de distribuir las solicitudes por todas las bandas disponibles.
- En la figura 3.6 e), se puede ver un ejemplo de las peticiones en el espacio espectral de una banda. Las peticiones no utilizan necesariamente espacios espectrales colindantes, lo que puede confundir a la hora de asignar una petición; por ejemplo, si $\alpha = 40$ y llega una petición con un tamaño de 100 FSU, debería asignarse a B_0 ya que porcentualmente la capacidad máxima disponible es de 207 FSU. Sin embargo, tal como se aprecia en el ejemplo, si ya se han aceptado varias conexiones puede ocurrir que algunas conexiones previamente asignadas aun se encuentren en ejecución, por ejemplo se tienen tres conexiones previas que tienen un tamaño de 30, 17 y 60 FSU, la capacidad total disponible es de 100 FSU pero no hay espacio colindante para asignar esta solicitud ya que las asignaciones previas no deben estar necesariamente una al lado de la otra, por lo que no se podrá asignar en B_0 y debe realizarse la búsqueda en la siguiente banda.

Si se estudia nuevamente el ejemplo presente en la figura 3.6 con un orden de búsqueda de banda $[B_0 = C, B_1 = L, B_2 = S, B_3 = E]$ y $[B_4 = C, B_5 = L, B_6 = S, B_7 = E]$, y un umbral $\alpha = 0$ [%], entonces la probabilidad de bloqueo del algoritmo propuesto α converge al resultado obtenido por Sambo [18]. Lo mismo ocurre con la probabilidad de bloqueo cuando $\alpha = 100$ [%] y se mantiene el orden de búsqueda.

En este trabajo se menciona que el algoritmo propuesto α basa su estructura de búsqueda en el algoritmo propuesto por Sambo [18]. Sin embargo, presentan diferencias significativas y suficientes para establecer que no son el mismo algoritmo y tampoco una variación del mismo. El algoritmo de Sambo [18] prioriza que las solicitudes se ejecuten utilizando la modulación de mayor orden disponible, con la finalidad de aumentar la velocidad de transmisión de información (ver Tabla 3.3). Una vez que selecciona un formato de modulación, luego selecciona una banda espectral donde se busca establecer la conexión, luego realiza una estimación de la OSNR (Optical Signal-to-Noise) para determinar si el formato de modulación seleccionado cumple con las restricciones del BER (Bit-Error-Rate) que se establezcan y finalmente determina si hay espectro disponible en la banda seleccionada para realizar la conexiones. El algoritmo de Sambo presenta una complejidad considerable ya que debe estimar el OSNR en cada una de sus iteraciones, lo cual a su vez lo convierte en un algoritmo relativamente lento de ejecutar. La ventaja que presenta el algoritmo de

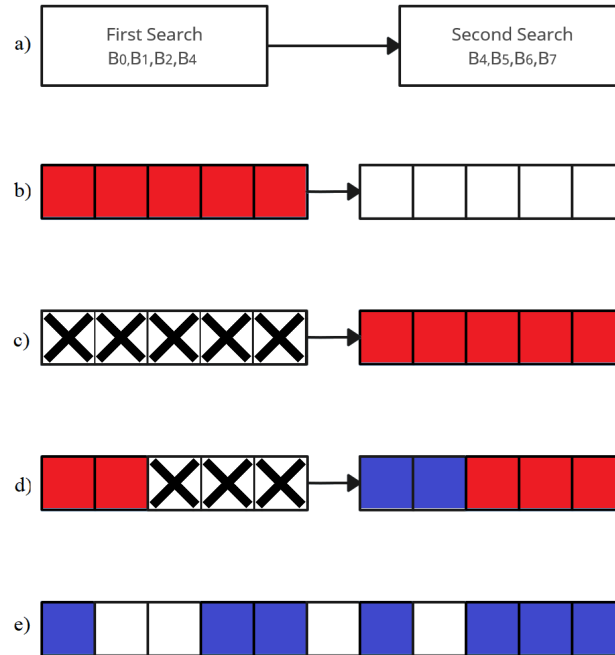


Figura 3.6: a) Efecto del umbral α , b) $\alpha=0$, c) $\alpha=100$, d) $\alpha=60$, e) Uso del espectro

Sambo es que su estructura es independiente del número de bandas que se tengan disponibles, es decir que se puede utilizar en escenarios donde solo se tiene disponible la banda $[C]$ y en escenarios donde se encuentran disponibles las bandas $[C, L, S, E]$.

El algoritmo propuesto α prioriza la búsqueda de la banda espectral y a partir del espectro disponible determina el formato de modulación de mayor orden a partir de las Tablas 3.2 y 3.3, las cuales se encuentran tabuladas para un $BER=4,7*10^{-3}$ y en donde se pueden ver la capacidad en FSU que debe utilizar cada conexión dependiendo del formato de modulación y la banda espectral en donde se busque realizar la conexión. Se aprecia que el algoritmo propuesto α depende directamente de tablas tabuladas por lo que el proceso de búsqueda y asignación es considerablemente rápido.

Después de ver la figura 3.3 se puede determinar que el algoritmo propuesto presenta una complejidad computacional de naturaleza casi lineal $O(n * \log(n))$, es decir que el tiempo de ejecución aumenta con respecto al número de solicitudes n de forma casi lineal. A diferencia de el algoritmo de Sambo, el algoritmo propuesto α considera que se tienen a disposición las bandas espectrales $[C, L, S, E]$.

3.3. Algoritmo propuesto: Orden de banda

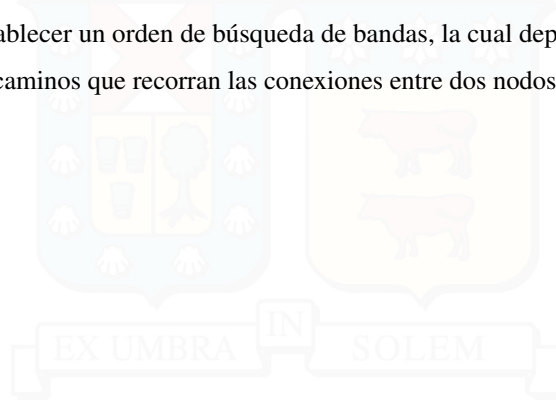
Este trabajo busca demostrar que se puede disminuir la probabilidad de bloqueo de una red óptica distribuyendo las solicitudes de conexión en varias bandas espectrales. Para cumplir el propósito de distribuir la información se establece el umbral α mediante el proceso que se puede apreciar en la figura 3.3. En la sección anterior se comentó que el algoritmo propuesto α basa su estructura de búsqueda en el algoritmo de Sambo. Sin embargo, hasta el momento no se ha establecido ninguna restricción con respecto al orden de asignación de las bandas espectrales. En el caso del algoritmo de Sambo se considera que la búsqueda se realiza en el orden $[C, L, S, E]$ comenzado con la C y terminado con la E , se puede establecer que el razonamiento detrás de este orden de búsqueda es porque en la práctica las comunicaciones ópticas se realizan principalmente por la banda C , la banda L ya se disponible para su uso practico [22] y las bandas $[S, E]$ aun se encuentran en estudio como se comento anteriormente. Por lo tanto se puede establecer que el razonamiento de búsqueda del algoritmo de Sambo es su practicidad y aplicabilidad directa en cualquier red óptica independiente del número de bandas espectrales que tenga disponible.

El algoritmo propuesto α sólo indica que buscará las bandas en orden progresivo de B_0 a B_7 para asignar las solicitudes en una banda espectral. Sin embargo, solo establece que la primera búsqueda estará restringida por el umbral α y se realizara en las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$, y la segunda búsqueda se realizara en las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$ las cuales no tendrán restricciones en su capacidad espectral. El algoritmo nunca establece la identidad de las bandas B , por lo que puede seguir cualquier lógica de trabajo para asignar las solicitudes.

Este trabajo propone que al modificar el orden de búsqueda de las bandas la probabilidad de bloqueo tendrá variaciones a pesar de que se pueda trabajar con la misma semilla de solicitudes, por lo tanto se puede encontrar un cierto orden de banda de manera que la probabilidad de bloqueo sea mínima con respecto a otros ordenes de banda. La propuesta anterior tiene su base en las tablas tabuladas 3.2 y 3.3, en donde se aprecia que cada banda espectral tiene una capacidad diferente en FSU, presentan distintas limitaciones físicas que afectan al alcance máximo en distancia y que la cantidad de FSU necesarios para la conexión varia dependiendo de la banda por la cual se busca asignar la solicitud y el formato de modulación que se utilizará. Al considerar todas las variables disponibles no se puede considerar a priori que el orden de búsqueda de bandas $[C, L, S, E]$ presente la menor probabilidad de bloqueo en la red.

Si se considera un escenario en donde se pueda tener a disposición las cuatro bandas espectrales $[C, L, S, E]$ para su uso comercial, entonces el argumento de realizar la búsqueda de las bandas a partir de los recursos que se tienen en la actualidad deja de tener el peso suficiente para establecer un orden de búsqueda único. Se debe considerar que existe una diversidad de redes ópticas y dadas sus características cambiar el orden de búsqueda para disminuir la probabilidad de bloqueo se considera una de las soluciones con mayor atractivo práctico y comercial, por su facilidad de ejecución y costo de implementación.

En general, la naturaleza de cada una de las bandas disponibles presenta diferentes características: la banda **L** es la que alcanza distancias físicas más significativas con modulaciones de alto nivel, la banda **C** es la banda espectral más utilizada por las compañías de servicios de Internet, la banda **S** es colindante a la banda **C** y presenta una mayor capacidad espectral, y la banda **E**, tiene una gran capacidad espectral disponible pero con importantes limitaciones de distancia físicas. Considerando lo anterior se pueden establecer muchas lógicas de trabajo para establecer un orden de búsqueda de bandas, la cual dependerá del tamaño de la red ópticas estudiada y de los caminos que recorran las conexiones entre dos nodos.



4 | Simulación del Experimento

El objetivo de esta tesis es disminuir la probabilidad de bloqueo de la red de comunicaciones por fibra óptica utilizando el algoritmo propuesto en el capítulo 3. Para determinar el desempeño de la red se utilizó un simulador dirigido por eventos construido en Python, modificando el simulador Flex-Net Sim [8] para arquitectura multibanda, para evaluar la probabilidad de bloqueo de conexiones de Sambo (como referencia). Se simuló el funcionamiento de una red óptica elástica multibanda considerando como entradas: la topología de la red, las bandas disponibles y su capacidad en FSU, y el conjunto de velocidades binarias y formatos de modulación soportados por las redes, la tabla de alcance óptico (MAR), y el número de FSU requeridas por los diferentes formatos de modulación y velocidades binarias (Tabla 3.3). La petición de conexión se simuló como un proceso de Poisson, con una distribución exponencial para los periodos de tiempo de espera. La simulación se completó, considerando un intervalo de confianza del 95 % con un 5 % de error relativo. Se consideró un tiempo de calentamiento de 100.000 llegadas.

Se define la variable $D[\%]$ en la ecuación 4.1 como la diferencia porcentual entre la probabilidad de bloque propuesto por Sambo P_{Sambo} [18] y la probabilidad de boqueo $P_{Propuesta}$ que se obtiene después de aplicar el algoritmo propuesto umbral α y el cambio de orden de banda de búsqueda.

$$D[\%] = 100 * (P_{Sambo} - P_{Propuesta}) \quad (4.1)$$

La variable $D[\%]$ se encuentra en porcentaje dado que se busca comparar el resultado de ambos algoritmos. En este sentido, cuando el valor de $D[\%] > 0$ implica que la $P_{Propuesta}$ es menor que la referencia P_{Sambo} , lo que significa que el algoritmo propuesto presenta mejores resultados. En el caso de que $D[\%] < 0$ implica que el resultado obtenido por $P_{Propuesta}$ es mayor que la referencia P_{Sambo} por lo que la combinación obtenida por el algoritmo propuesto presenta probabilidades de bloqueo mayores que las propuestas por Sambo.

En este trabajo se lo nombra como $M_\alpha[\%]$ a las combinaciones de umbral α y combinación de banda que obtengan mayor valor de $D[\%] > 0$ y se le nombra $m_\alpha[\%]$ a la combinación que presente el menor valor cuando $D[\%] < 0$.

4.1. Configuración de las simulaciones

Se deben tener en consideración diferentes factores para determinar la configuración que debe tener el sistema para obtener la combinación de variables que minimice la probabilidad de bloqueo de la red. A continuación se presenta una lista de consideraciones necesarias para que los resultados de las simulaciones sea prometedor con respecto al objetivo de esta tesis:

- 1.- Esta tesis propone un algoritmo que sea de uso industrial inmediato con un bajo nivel de entrada y alta aplicabilidad, para esto se debe asumir que los operadores tienen la capacidad de trabajar en las bandas espectrales [C,L,S,E], por lo que es razonable trabajar considerando que se tienen a disposición todas las bandas espectrales disponibles. Además, es uno de los tres criterios de diferenciación que presenta el algoritmo propuesto α con respecto a su referencia [18].
- 2.- En el algoritmo de Sambo [18] los autores consideraron una red de transporte española con 30 nodos y 55 enlaces bidireccional [17]. Una de las principales características de esta red española es que la distancia es de 80[km] para todos los enlaces entre nodos. En esta tesis no se tiene la disposición la configuración de red que presenta en [17], por lo que no es posible por el momento probar el algoritmo umbral α en dicha red. En este sentido se utilizan las topologías NSFNet y UKNet para realizar los experimentos. Ambas redes presentan una distancia entre nodos de varios cientos de kilómetros, por lo que al probar el algoritmo umbral α y compararlo con el algoritmo de Sambo se espera que la diferencia porcentual $D[\%]$ sea pequeña dada la naturaleza de las bandas espectrales, especialmente la banda E dado que no es posible realizar una conexión a distancias muy largas por esta banda espectral.
- 3.- Dependiendo de la configuración de la red y la cantidad de nodos que existan entre los nodos de inicio y término se puede variar la elección de ruta. Existen diversos criterios para la elección de camino, en este trabajo se utilizarán los criterios que minimicen la distancia entre los nodos de inicio y término.
- 4.- Debido a las limitaciones físicas de las bandas espectrales, se considera que cuando se trabaja con una topología de red de tamaño muy grande, como es el caso de la red UKNet, realizar más de un proceso de búsqueda puede llegar a ser infructuoso.
- 5.- Al trabajar con todo el espectro disponible y considerando que se está trabajando con una red elástica transparente entonces la única manera de determinar la mejor combinación es probar cada una de las posibilidades posibles. Los valores posibles para las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ y $[B_4, B_5, B_6, B_7]$ son las bandas [C, L, S, E] y para asignar las bandas se debe tener en cuenta que no se debe repetir la banda en la búsqueda respectiva, es decir que $B_0 \neq B_1 \neq B_2 \neq B_3$ y que $B_4 \neq B_5 \neq B_6 \neq B_7$, por lo tanto existen un total de 24 combinaciones (4!) para la primera y segunda búsqueda respectivamente, lo cual implica que existe un total de 576 combinaciones de bandas espectrales.

Para que el proceso de búsqueda sea eficaz se utilizaron 8 combinaciones de banda para las topologías NSFNet y UKNet. La explicación de las combinaciones de búsqueda de bandas es la siguiente, recordando que el orden de búsqueda tiene la siguiente estructura $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ - $[B_4, B_5, B_6, B_7]$ correspondientes a la primera búsqueda y la segunda búsqueda respectivamente. Los criterios son los siguientes:

- 1.- **[C,L,S,E][C,L,S,E]**: Prioriza las bandas espectrales que se encuentran en uso de forma comercial en la actualidad, en este caso la banda **C** es la primera por la cual se realiza ambas búsquedas y la banda **E** es la última prioridad ya que su uso en la industria aun se encuentra en estudio. Este orden de búsqueda de bandas es el utilizado en el algoritmo de Sambo ?? y se utiliza como referencia para comparar todas las combinaciones de bandas y umbrales α .
- 2.- **[C,L,S,E][E,S,L,C]**: Primero prioriza el orden de uso comercial y luego realiza la búsqueda en el orden inverso. En otras palabras, se realiza la búsqueda dos veces seguidas en la banda **E**, primero restringida al umbral α y luego en todo el espacio disponible, por lo que aumenta la posibilidad de ubicar una solicitud en dicha banda.
- 3.- **[E,S,L,C][E,S,L,C]**: Prioriza las bandas que se encuentran en estudio y las bandas comerciales tienen baja prioridad en la búsqueda.
- 4.- **[E,S,L,C][C,L,S,E]**: Prioriza las bandas que se encuentran en estudio, pero la segunda búsqueda prioriza las bandas con mayor uso comercial.
- 5.- **[C,E,L,S][C,E,L,S]**: Prioriza la banda que tiene una mayor capacidad de conexión en términos de distancia física y luego la que tiene la menor capacidad de conexión de distancia física.
- 6.- **[E,C,L,S][E,C,L,S]**: Se prioriza la banda que tiene una mayor cantidad de FSU disponibles y luego la banda que tiene la mayor capacidad de conexión en términos de distancia.
- 7.- **[L,S,E,C][C,E,S,L]**: Se termina la primera búsqueda de bandas y se comienza la segunda utilizando la banda espectral con mayor uso comercial y mayor capacidad de conexión en términos de distancia.
- 8.- **[L,S,C,E][E,C,S,L]**: Se termina la primera búsqueda de bandas y se comienza la segunda utilizando la banda espectral con mayor tamaño en FSU.

Debido a los resultados obtenidos la sub capítulo 4.2, para las simulaciones de la red NSFNet utilizando el criterio del segundo camino mas corto entre nodos de inicio y termino "Path1", se agregan nuevas búsquedas de banda con el objetivo de ampliar el rango de combinaciones que buscan optimizar $D[\%]$.

- 9.- **[E,C,L,S][C,E,L,S]**: Prioriza la banda espectral con mayor tamaño en FSU en la primera búsqueda y prioriza la banda espectral con mayor capacidad en términos de distancia y uso comercial en la segunda búsqueda.

- 10.- **[C,E,L,S][E,C,L,S]**: Prioriza la banda espectral con mayor capacidad en términos de distancia y uso comercial en la primera búsqueda y prioriza la banda espectral con el mayor tamaño en FSU en la segunda búsqueda.
 - 11.- **[C,E,S,L][C,E,S,L]**: Prioriza la banda que tiene una mayor capacidad de conexión en términos de distancia física y luego la que tiene la menor capacidad de conexión de distancia física en ambas búsquedas. La diferencia con el la búsqueda del punto 5 es el orden prioridad de las bandas L y S.
 - 12.- **[E,C,S,L][E,C,S,L]**: Se prioriza la banda que tiene una mayor cantidad de FSU disponibles y luego la banda que tiene la mayor capacidad de conexión en términos de distancia en ambas búsquedas. La diferencia con el la búsqueda del punto 6 es el orden prioridad de las bandas L y S.
- 6.- A diferencia del orden de búsqueda de las bandas espectral, las cuales tienen un limite contable de combinaciones, el valor del umbral α tiene restricciones para sus limites superior e inferior, pero se puede aplicar cualquier valor que se encuentre en este rango y su subdivisión es una variable libre, es decir que el umbral α no tiene que ser un número entero. Los dos criterios que limitan el valor de α son los siguientes: $\alpha \geq 0[\%]$ y $\alpha \leq 100[\%]$. Se debe recordar que al utilizar $\alpha = 0[\%]$ corresponde a realizar la búsqueda de asignación de bandas solo en $[B_0, B_1, B_2, B_3]$ y al utilizar $\alpha = 100[\%]$ corresponde a realizar la búsqueda de asignación de bandas solo en $[B_4, B_5, B_6, B_7]$.

Se debe tener en consideración que al realizar la simulación con el orden de banda **[C,L,S,E][C,L,S,E]** con un umbral $\alpha = 0[\%]$ o $\alpha = 100[\%]$, la probabilidad de bloqueo de la red es igual en ambos casos y es el mismo que la referencia dada por el algoritmo de Sambo [18].

- 7.- El objetivo de la tesis es que los resultados sean lo mas reales posibles, por lo que se utilización cargas de trafico ρ bajas de entre 100 a 500 [Erlang], hasta cargas de trafico altas de 5000[Erlang].
- 8.- Esta tesis considera que se trabaja en redes transparente, lo que significa que al realizar una conexión entre un nodo inicio y otro término, esta conexión se realizará por la misma banda independientemente del camino. Esto significa que durante todo el proceso de conexión no se realizó ningún proceso de switcheo o cambio de bandas en el camino.
- 9.- En este trabajo se utilizó una red elástica transparente y las Tablas 3.2 y 3.3, las cuales considera un BER_{th} igual a $4,7 * 10^{-3}$ para diversos formatos de modulación. Estas tablas tabuladas permiten que este trabajo no considere directamente los efectos no lineales producto del cambio de banda en los nodos al momento de transmitir por diversas bandas espectrales.

En la Tabla 4.1 se encuentra un resumen de los principales criterios utilizados en esta tesis para obtener una combinación que optimice $D[\%]$.

Tabla 4.1: Criterios de configuración para las simulaciones

	Criterio
1	Se considera un escenario en donde se tienen a disposición las bandas espectrales [C, L, S, E] .
2	Se trabajo con las topologías de red NSFNet y UKNet.
3	Se utilizaron dos criterios de búsqueda de ruta para la topología NSFNet.
4	Se utilizo un criterio de búsqueda de rutas para la topología UKNet.
5	Se realizaron 8 combinaciones de búsqueda de banda para el criterio que se utiliza en NSFNet y UKNet.
6	Se utilizaron 11 combinaciones de búsqueda de banda para el criterio de ruta "Path 1" en la topologia NSFNet.
7	Se utilizo una carga de trafico ρ desde 100 hasta 5000 [Erlang].
8	El umbral α utilizado varia su valor desde 0[%] hasta 100[%], con pasos de 10 en 10.
9	Se considera que se trabaja con redes elásticas transparentes.
10	Se trabaja con datos obtenidos de las tablas tabuladas 3.2 y 3.3.



4.2. Simulación red NSFNet

Las simulaciones se realizaron en la red National Science Foundation's Network (NSFNet). La configuración de la red NSFNet se puede apreciar en la figura 4.1 y consta de 14 nodos y 42 enlaces, y se puede considerar de gran tamaño considerando que la distancia entre sus nodos se encuentra en miles de kilómetros. Para realizar las simulaciones se debe establecer la topología de la red, el valor del umbral α , la combinación de búsqueda de las bandas espectral y el criterio del camino recorrido.

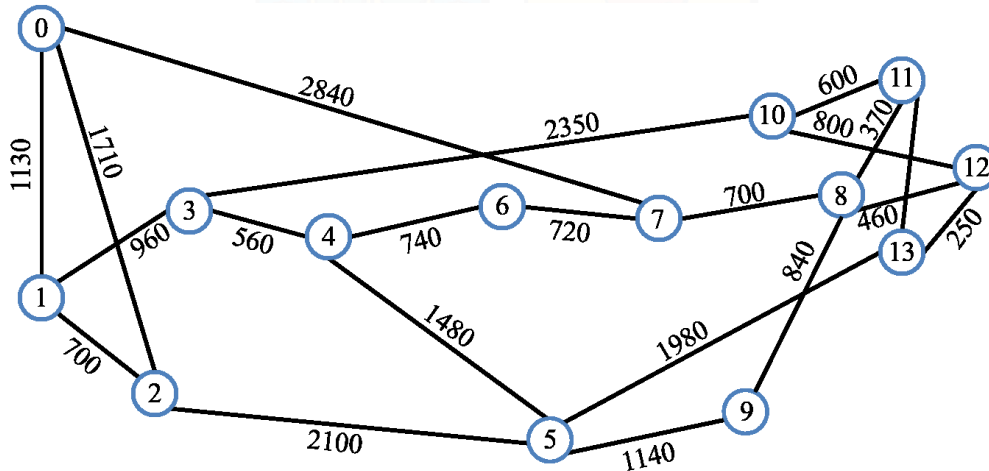


Figura 4.1: Topología de red de fibra óptica NSFNet

Dada la configuración de la topología de la red óptica analizada existen diversos caminos por los cuales se pueden conectar dos nodos, por lo que existen diversos criterios para seleccionar una ruta con el objetivo de minimizar la probabilidad de bloqueo. Se debe considerar que en este trabajo se tiene a disposición las bandas espectrales [C,L,S,L,E] se tiene que saber que por las Tablas 3.2 y 3.3 existen limitaciones físicas para el uso de las bandas. En este contexto la banda espectral E tiene la menor capacidad física (no es posible realizar una conexión después de una cierta distancia), pero posee la mayor cantidad de FSU disponibles.

4.2.1. Criterio de selección de Camino

Esta tesis busca disminuir la probabilidad de bloqueo a partir de la distribución de las solicitudes por todo el espectro disponible, por lo que la elección de un criterio de enlace entre nodos de inicio y término de una solicitud es esencial. El criterio utilizado en esta tesis es la elección del camino mas corto en distancia en kilómetros independientemente de la cantidad de nodos por las que tenga que pasar. En la Tabla 4.2 se aprecian ejemplos de selección de camino: Suponiendo que llega una solicitud que debe transmitir la información desde el nodo 0 hasta el nodo 1, en la tabla se aprecian tres criterios de camino:

- Path 0: El camino más corto en distancia, una conexión directa entre el nodo 0 y el nodo 1. La distancia entre los nodos es de 1130[km].
- Path 1: El segundo camino más corto, la solicitud comienza en el nodo 0, viaja al nodo 2 y termina su camino en el nodo 1. La distancia total recorrida es de 2410[km].
- Path 2: El tercer camino más corto, la solicitud comienza en el nodo 0, pasa al nodo 7, se mueve al nodo 6, se traslada al 4, se conecta al 3 y finalmente llega al nodo 1. La distancia total recorrida es de 5820[km]

En la Tabla 4.2 también se pueden apreciar los ejemplos en donde el nodo de inicio es 0 y el nodo de termino es 2, y cuando el nodo de inicio es 1 y el nodo de termino es 10. En todos los ejemplos de la tabla se aprecia claramente que el criterio de camino "Path 2" presenta recorridos muy largos por lo que el uso practico de la banda espectral **E** se encuentra limitada en este criterio, por lo que se decidió continuar este estudio sin considerar el "Path 2" (ver Tabla3.2))

Tabla 4.2: Criterios de rutas de conexión entre nodos

Path	Nodo inicio	Nodo termino	Ruta	Distancia[km]
0	0	1	0-1	1130
1	0	1	0-2-1	2410
2	0	1	0-7-6-4-3-1	5820
0	0	2	0-2	1710
1	0	2	0-1-2	1830
2	0	2	0-7-6-4-5-2	7880
0	1	10	1-3-10	3310
1	1	10	1-2-5-13-11-10	5840
2	1	10	1-0-7-8-12-10	5930

En las figuras 4.2 y 4.4 se puede apreciar un histograma de todas las distancias existente entre dos nodos, es decir entre los nodos de inicio X_n y el nodo de termino Y_m , en donde n y m son valores de 0 a 13, y $n \neq m$, para los criterios de camino *Path 0* y *Path 1* respectivamente.

En las figuras 4.3 y 4.5 se observa la representación gráfica de la Tabla 3.3, es decir formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km] (ver figura 3.2), ajustando el eje horizontal para

tener los mismos límites que las figuras 4.2 y 4.4. Al estudiar los histogramas y las limitaciones físicas de las bandas espectrales de forma simultánea se puede realizar el siguiente análisis:

- **Situación 1:** En la figura 4.2 se aprecia el histograma de los caminos posibles de la topología NSFNet al utilizar el criterio más corto *Path 0*. La figura tiene la siguiente interpretación: El promedio de la distancia entre los enlaces es de 2042 [km] y la distancia máxima es de 3900 [km].
 - **Criterio del algoritmo de Sambo:** Este algoritmo busca optimizar el formato de modulación a partir del orden de banda [C, L, S, E] y utilizando una lógica de desborde:
 - Las distancias más cortas tendrán una modulación de entre 64-QAM y 32-QAM. Se transmitirán principalmente por la banda C.
 - Las distancias menores al promedio tendrán un formato de modulación de 16-QAM y se transmitirán por la banda [C,L].
 - Para distancias mayores al promedio se utilizará un formato 8-QAM por las bandas [C,L,S].
 - Solo es posible utilizar la banda E para distancias menores al promedio y, dado que es la última banda de búsqueda, el formato de modulación utilizado en esta banda es principalmente QPSK y BPSK.
 - **Criterio del algoritmo propuesto α :** Se seleccionará un orden de búsqueda de banda espectral y se utiliza un umbral para distribuir la información.
 - En este caso se aprecia que un poco menos de la mitad de las conexiones no se podrá realizar por la banda E por lo que se prioriza la búsqueda en esta banda, de esa manera se podrían llegar a tener modulaciones de entre 32-QAM a 16-QAM.
 - Se ve que las conexiones de mayor distancia solo pueden encajar en una sola banda con un formato de modulación de 8-QAM, pero es posible ubicarla en tres bandas al utilizar una modulación de QPSK. En este caso se concluye que la última banda de búsqueda debe ser L o C.
 - Dado que alrededor del promedio la modulación se mantendrá en 8-QAM, se llega a que la segunda banda que se debe utilizar es la banda S.
 - Finalmente, la búsqueda de banda debe ser en el orden [E,S,C,L] o [E,S,L,C] para disminuir la probabilidad de bloqueo y maximizar el formato de modulación.
 - No es posible obtener el valor del umbral α óptimo a partir de este gráfico.

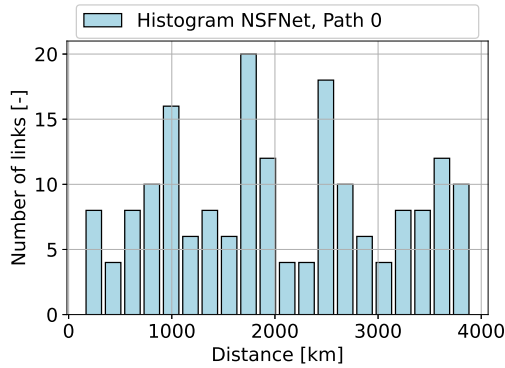


Figura 4.2: Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red NSFNet, Path 0.

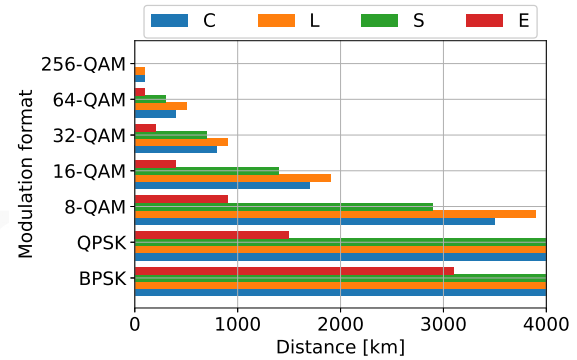


Figura 4.3: Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km].

- **Situación 2:** En la figura 4.4 se aprecia el histograma de los caminos posibles de la topología NSFNet al utilizar el criterio de la segunda ruta más corta *Path 1*. La figura tiene la siguiente interpretación: El promedio de la distancia entre los enlaces es de 3461 [km] y la distancia máxima es de 6450 [km].
 - **Criterio del algoritmo de Sambo:** Este algoritmo busca optimizar el formato de modulación a partir del orden de banda [C, L, S, E] y utilizando una lógica de desborde:
 - Las distancias más cortas tendrán una modulación de entre 8-QAM y QPSK. Se transmitirán principalmente por la banda C.
 - Las distancias menores al promedio tendrán un formato de modulación de QPSK y se transmitirán por la banda [C,L].
 - Para distancias mayores al promedio se utilizara un formato QPSK por las bandas [C,L,S].
 - Solo es posible utilizar la banda E para distancias menores al promedio y, dado que es la última banda de búsqueda, probablemente esta banda no sea prácticamente utilizada en este escenario.
 - **Criterio del algoritmo propuesto α :** Se seleccionara un orden de búsqueda de banda espectral y se utiliza un umbral para distribuir la información.
 - Se puede dividir el histograma en cuatro partes dependiendo de su distancia, la distancia mas corta viene a ser la primera parte y la distancia mas larga viene a ser la cuarta parte.
 - Se aprecia que en la cuarta parte no es posible utilizar la banda E y que se realizarían conexiones con un formato de modulación de 8-QAM principalmente por la banda L. Por lo que la banda L es la última que se debe buscar.
 - La búsqueda de banda debe comenzar con la banda E, dado que es posible llegar a modulaciones de entre 16-QAM y 8-QAM.

- La segunda banda debe ser la C, dado que las bandas C y S comparten las mismas modulaciones en el mismo rango, excepto que la banda C tiene un alcance mayor en bajas distancias por lo que es posible utilizar formatos de modulación de 64-QAM.
- Finalmente, la búsqueda de banda debe ser en el orden [E,C,S,L] para disminuir la probabilidad de bloqueo y maximizar el formato de modulación.
- No es posible obtener el valor del umbral α óptimo a partir de este gráfico.

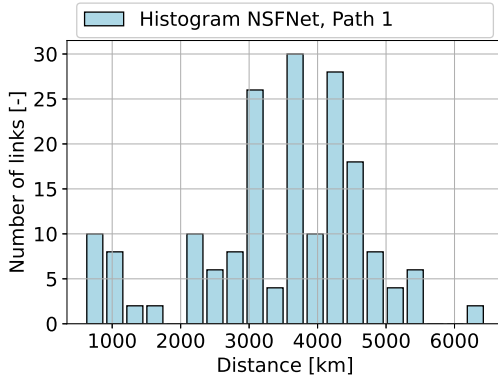


Figura 4.4: Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red NSFNet, Path 1.

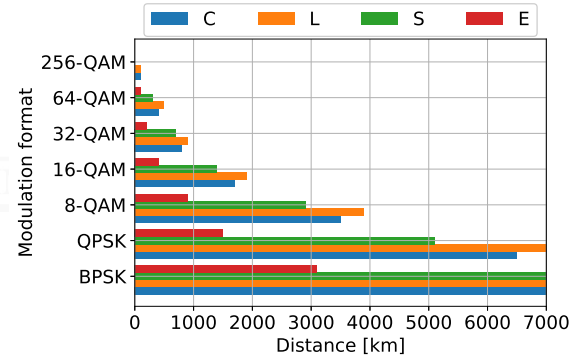


Figura 4.5: Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km].

A partir de las figuras 4.2 y 4.4 se puede apreciar la importancia de la elección del camino que debe seguir la conexión. Al observar las figuras de los histogramas y analizar la Tabla 4.2 se determinó que el criterio "Path 2", que representa la segunda distancia menor entre los nodos, presenta limitaciones físicas que le impiden tener un formato de modulación de alto nivel al aplicarlo en un sistema multibanda en la topología NSFNet, esto ocurre principalmente por la cantidad de nodos, la distancia entre los nodos y la cantidad de enlaces que posee la red estudiada.

Al estudiar el análisis realizado a las figuras 4.2 y 4.4 a partir del algoritmo de Sambo y el algoritmo propuesto α se puede distinguir que el algoritmo de Sambo desaprovecha la presencia de la banda E. En términos pragmáticos desaprovechar una banda espectral en un escenario en donde se tiene completa disponibilidad para trabajar en dicha banda en términos tecnológicos no es lo deseable. En este sentido, al no aprovechar el uso de este recurso las empresas de servicio pierden oportunidades de conexión y aumentan su costo tecnológico de manera injustificada. Por lo tanto, es necesario demostrar que el uso de multibanda es útil en la industria, y sin aumentar los costos asociados en la medida de lo posible.

Para optimizar la probabilidad de bloqueo se debe seleccionar adecuadamente la ruta entre nodos, por lo que se simuló la red NSFNet utilizando los criterios de camino *Path 0* y *Path 1*, con una carga de tráfico ρ que varía entre 100 a 5000 [Erlang], un umbral $\alpha = 0$ [%] y un orden de búsqueda de banda en el orden [C,L,S,E] para la primera búsqueda de banda y [C,L,S,E] para la segunda búsqueda de banda,

esta configuración corresponde a la obtenida por los autores en [18]. En la figura 4.6 se puede apreciar la probabilidad de bloqueo de la red con respecto a la carga de tráfico ρ en [Erlang] para la red NSFNet con los criterios de camino "Path 0" y "Path 1".

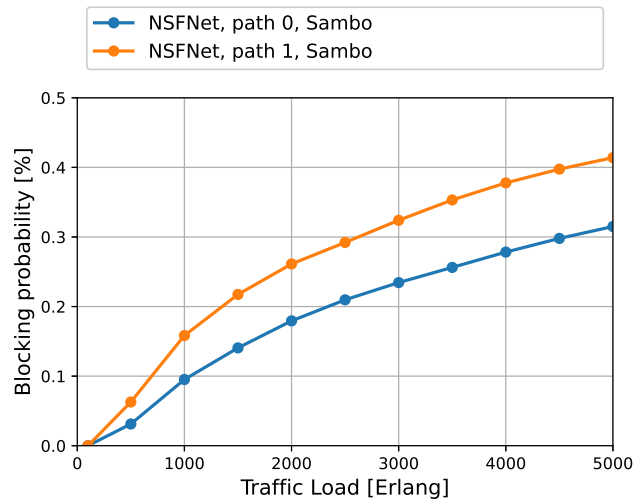


Figura 4.6: Probabilidad de bloqueo de la red NSFNet al utilizar el algoritmo de Sambo con "Path"0 y "Path"1

En la figura 4.6 se puede ver que la probabilidad de bloqueo tiene la misma naturaleza de crecimiento logarítmico en ambos criterios de camino. La figura muestra que al utilizar el criterio de camino "Path 0" es decir el mas corto, la probabilidad de bloqueo disminuye significativamente con respecto a lo obtenido al utilizar el criterio "Path 1", es decir el segundo más corto.

La diferencia que en la probabilidad de bloqueo que se aprecia en la figura 4.6 se debe al uso de las multi bandas, específicamente se aprovecha el uso de la banda espectral \mathbf{E} , tal como se explica en el análisis de las figuras 4.2 y 4.4. Considerando lo anterior, para esta tesis todos los resultados presentados corresponden al uso del criterio más corto entre nodos *Path 0*.

4.2.2. Resultados de simulación: umbral α constante

Uno de los objetivos de este trabajo es disminuir la probabilidad de bloqueo de la red a partir de la distribución de las solicitudes por todo el espectro, para esto se agregan dos variables: Modificar el orden de búsqueda de bandas espectrales asumiendo un escenario en donde se tenga acceso a todo el espectro comercial. Agregar una variable llamada α la cual actúa como un umbral duro que divide la búsqueda espectral en dos partes. El efecto directo de agregar ambas variables al sistema de asignación de solicitudes es que la asignación se divide en dos procesos de búsqueda:

- La primera búsqueda: Para que la solicitud sea asignada se debe sumar el tamaño actual de la solicitud en FSU a la ocupación total actual de la banda en FSU, el resultado debe ser menor que el tamaño total de la banda multiplicado por el factor $(1 - \alpha)$, tal como se aprecia en la ecuación 3.1 del capítulo 3. Esta búsqueda recorre las bandas $[B_0, B_1, B_2, B_3]$, comenzando en B_0 y finalizando en B_3 .
- La segunda búsqueda: En este caso, para que la solicitud sea asignada su tamaño en FSU sumado a la ocupación del ancho de banda actual debe ser menor o igual al tamaño de la banda en FSU, tal como se explica en el capítulo 3. Esta búsqueda recorre las bandas $[B_4, B_5, B_6, B_7]$, comenzando en B_4 y finalizando en B_7 .

Considerando las posibles combinaciones de orden de búsqueda y umbral α posible se decide priorizar la aplicabilidad de este algoritmo a nivel industrial, por lo que se realizó la búsqueda en 8 combinaciones de banda y valores α que varían de 0[%] a 100[%] en intervalos de 10, la justificación de esta configuración se encuentra en el sub capítulo 4.1.

En las figuras 4.7 a 4.12 se encuentran los resultados de las simulaciones en la red NSFNet utilizando 8 combinaciones de banda y un valor de umbral α iguales a 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 % respectivamente. En las figuras se ve que el eje horizontal, correspondiente a la carga de tráfico ρ , varía de 100 a 5000 [Erlang] y en el eje vertical se encuentra el valor D [%] descrito en la ecuación 4.1.

Al analizar la figuras 4.7 a 4.12 se considera que cuando el valor de D [%] es mayor que cero implica que la probabilidad de bloqueo de la referencia (algoritmo de Sambo) es mayor que la probabilidad de bloqueo que se obtiene al aplicar el algoritmo propuesto α . En caso de que el valor de D [%] sea menor que cero implica que los resultados del algoritmo propuesto α son peores que los del algoritmo de referencia.

Durante las simulaciones se estableció el orden de búsqueda de bandas y el valor de umbral α como variables de entrada fijas, por lo que se puede establecer que los resultados observados en las figuras 4.7 a 4.12 son escenarios estáticos durante todo el proceso de simulación, se puede entender que sus condiciones iniciales no cambian durante el proceso de simulación.

Se puede realizar el siguiente análisis de los resultados de las figuras:

- Para la misma carga de tráfico y umbral α las probabilidades de bloqueo presentan notorias variaciones

para diferentes ordenes de búsqueda de banda, ver figuras 4.10 y 4.9. Se estima que esto sucede por el tamaño de las solicitudes en FSU, la distancia entre el nodo de inicio y el nodo de término, y el camino seleccionado. Estas variaciones sugieren que al distribuir las solicitudes por todo el espectro es posible obtener resultados optimistas con respecto a la disminución de la probabilidad de bloqueo.

- En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se aprecia que el valor de D [%] es mayor que 0 para cargas de tráfico mayores a 3000[Erlang] y un valor de umbral α entre 40 % a 80 %. Además, en la figura 4.11 se aprecia que D [%] > 0 para valores de carga de tráfico mayores a 1500 [Erlang], presentando un peak para una carga de trafico de 2000[Erlang], lo cual demuestra que es posible disminuir la probabilidad de bloqueo al distribuir las solicitudes pero el valor del umbral utilizado no puede ser determinado a priori, esto se debe principalmente a que todas las bandas espectrales tiene diferentes tamaño de ancho de banda y sus capacidades físicas de conexión son diferentes.

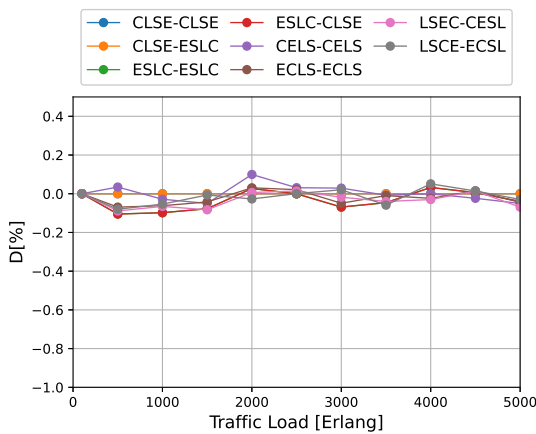


Figura 4.7: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 0$ [%].

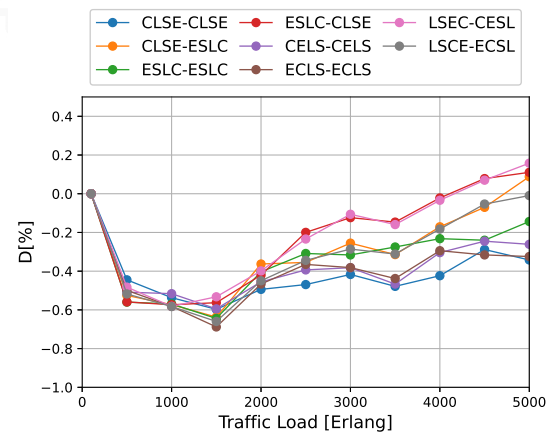


Figura 4.8: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 20$ [%].

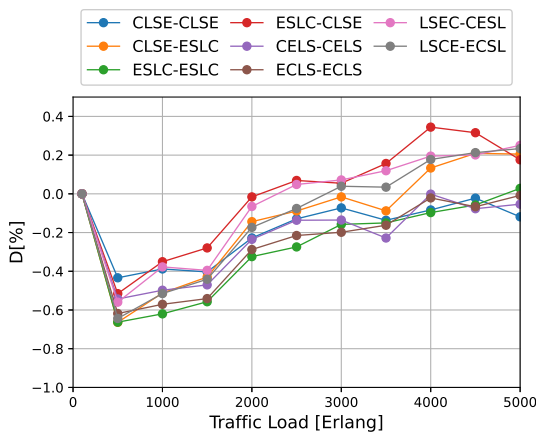


Figura 4.9: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 40$ [%].

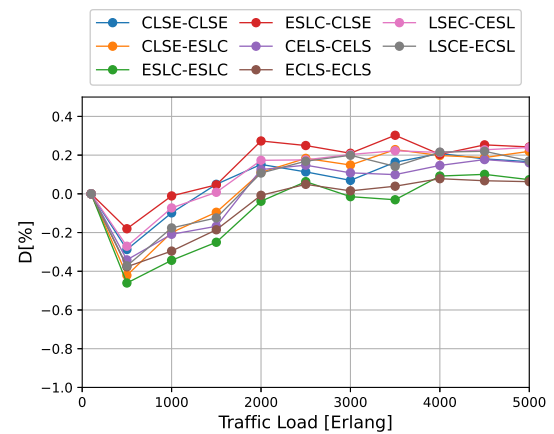


Figura 4.10: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 60$ [%].

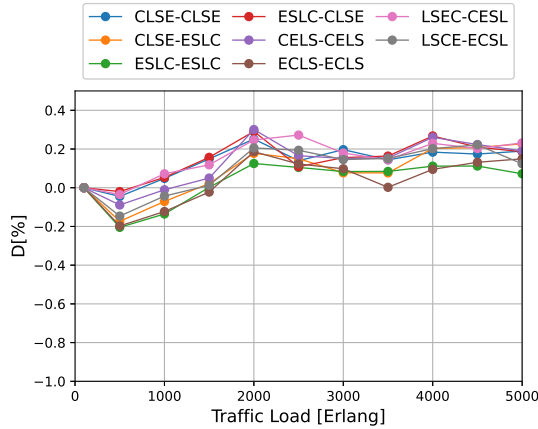


Figura 4.11: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 80$ [%].

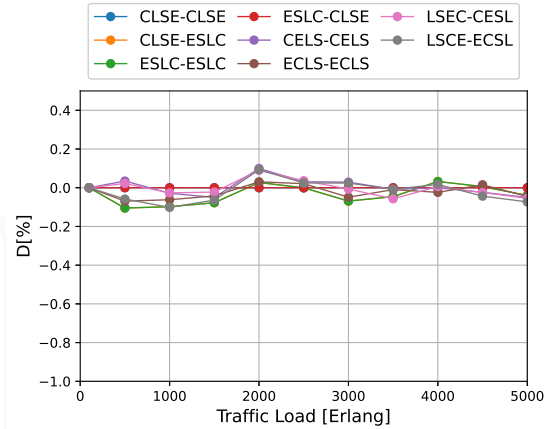


Figura 4.12: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\alpha = 100$ [%].

4.2.3. Resultados de simulación: umbral ρ constante

Los resultados obtenidos de las simulaciones en el sub capítulo 4.2.2 muestran el impacto que presenta la carga de tráfico ρ para las diversas combinaciones de búsqueda de banda y umbral α . Por lo tanto, es necesario interpretar los resultados obtenidos en el sub capítulo 4.2.2 utilizando la carga de tráfico como referencia.

En las figuras 4.13 a 4.18 el eje horizontal es el valor del umbral α y el eje vertical es el valor D [%] descrito en la ecuación 4.1. A partir de las figuras se deben analizar dos tendencias apreciables:

- En las figuras 4.14 a 4.18, la forma en la que se representan los resultados tiene una forma similar a una sinusoidal y a mitad que aumenta el valor de la carga de tráfico esta sinusoidal esta cambiando su fase de inicio. Por ejemplo en la figura 4.14 la curva parece un $-\sin(\omega t)$ y en la figura 4.15 la curva parece un $-\sin(\omega t + \Delta\phi)$. Aunque esta característica puede ocurrir debido a la topología específica de la red y al criterio de ruta seleccionado.
- En las figuras 4.13 a 4.18, el valor del umbral α para que D [%] > 0 depende directamente del valor de la carga de tráfico ρ . Esto implica que para obtener la menor carga de tráfico sin cambiar el orden de búsqueda de las bandas, a lo cual se le pueden asociar problemas de carácter no lineal propias de las redes ópticas, el umbral α debe ser una variable dependiente de ρ . A pesar de lo anterior, tener dos procesos de búsqueda de bandas con el objetivo de distribuir las solicitudes disminuye la probabilidad de bloqueo de la red.

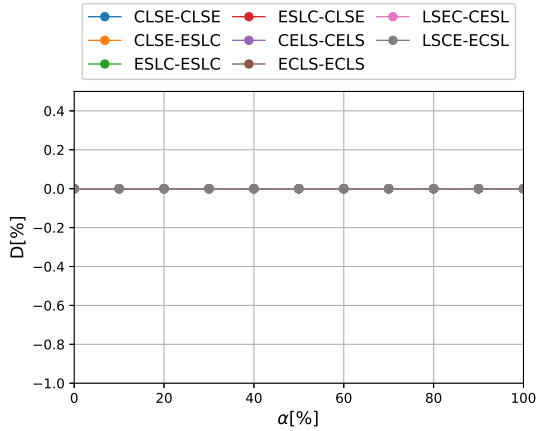


Figura 4.13: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 100$ [Erlang]

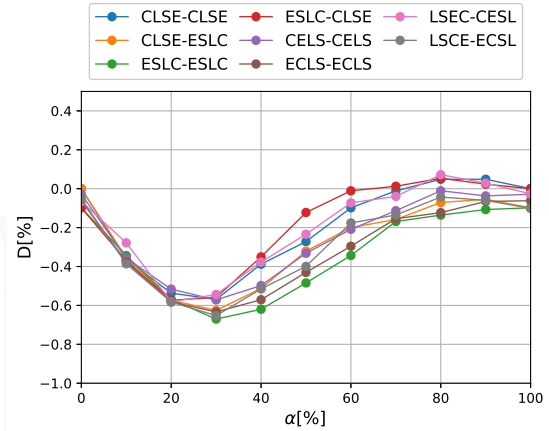


Figura 4.14: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 1000$ [Erlang]

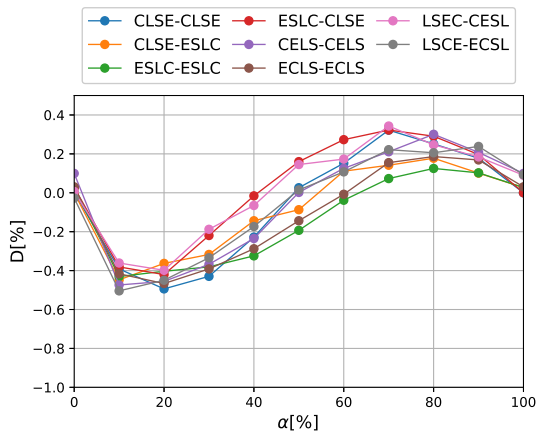


Figura 4.15: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 2000$ [Erlang]

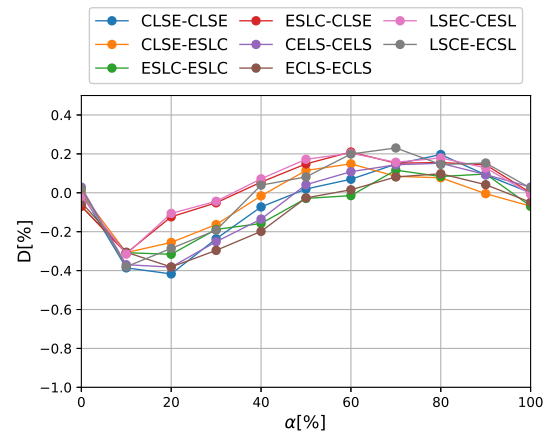


Figura 4.16: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 3000$ [Erlang]

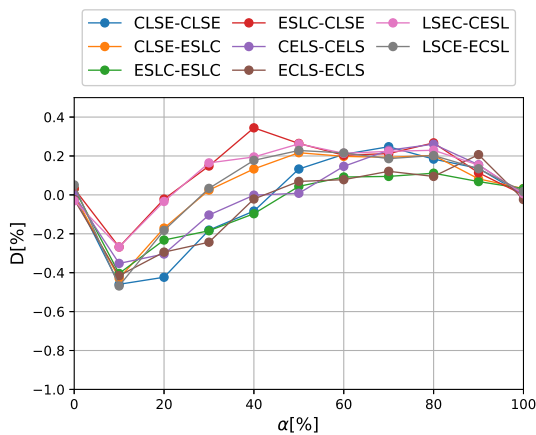


Figura 4.17: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 4000$ [Erlang]

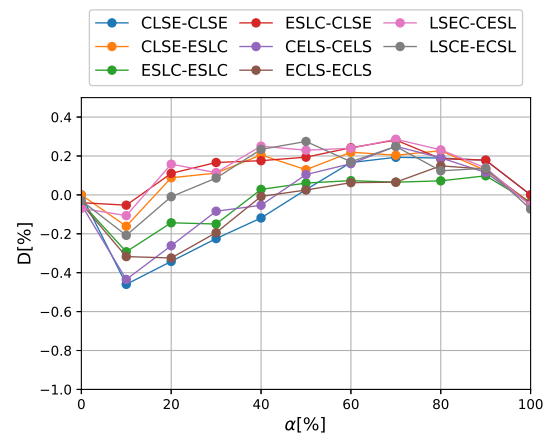


Figura 4.18: Resultados simulación utilizando la red NSFNet, Path=0 y $\rho = 5000$ [Erlang]

4.2.4. Distribución de los resultados NSFnet

Al realizar las simulaciones en la red NSFNet se puede obtener el valor de D [%] que maximice y minimice las diferencias porcentuales al utilizar dos criterios de caminos distintos (ver figuras 4.19 y 4.20). De forma similar, se logra obtener la relación entre el orden de búsqueda de banda espectral, umbral α y carga de tráfico ρ en el cual el valor de D [%] es máximo y mínimo (ver Tabla 4.3)

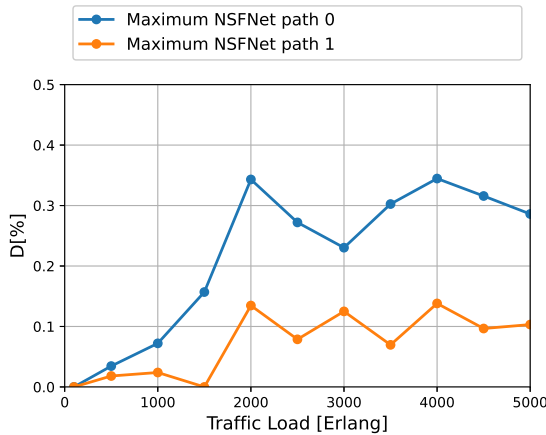


Figura 4.19: Diferencia porcentual máxima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α para diferentes decisiones de rutas para NSFNet

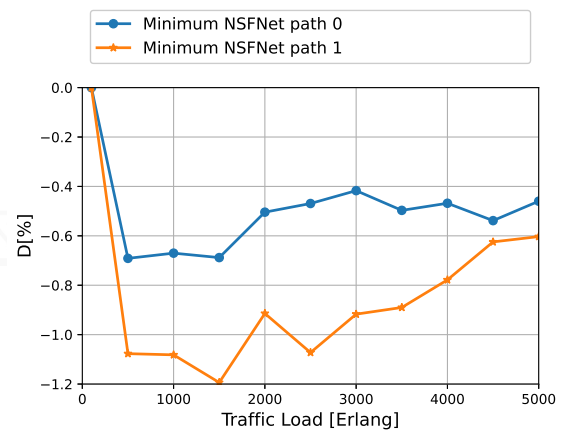


Figura 4.20: Diferencia porcentual mínima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α para diferentes decisiones de rutas para NSFNet

En la figura 4.19 se logran ver los mejores resultados de las simulaciones, en donde la probabilidad de bloqueo de la red a partir del algoritmo propuesto es menor que el valor de referencia. En la figura se aprecia la comparación de la misma red al utilizar dos criterios de ruta entre nodos distintos "Path 0" y "Path 1", se puede ver que la mejor combinación de umbral α y orden de búsqueda de banda siempre se obtiene al utilizar el camino "Path 0", por lo que el criterio de la menor distancia física entre nodos es óptimo en un escenario multibanda. En la figura se aprecia que para ambos escenarios el valor de D [%] aumenta para cargas de tráfico superiores a 2000[Erlang], lo cual demuestra la necesidad distribuir las solicitudes cuando la red es sometida a altas cargas de tráfico.

La figura 4.19 se puede considerar una mejora poco significativa dado que la probabilidad de bloqueo disminuye en un 0,34 [%] en el mejor de los escenarios. Sin embargo, se debe contextualizar el escenario, propósito y objetivo de esta tesis.

- El objetivo de disminuir la probabilidad de bloqueo a partir de cambios en el algoritmo se cumple.
- El propósito es ofrecer un algoritmo multibanda robusto que sea aplicable a nivel industrial, que tenga un bajo nivel de entrada y alta aplicabilidad. Además, justifica el uso de multi bandas en la industria del servicio de internet por fibra óptica.

- El contexto es la aplicación industrial, el algoritmo busca ser aplicado en empresas de servicio de internet utilizando fibra óptica. Este algoritmo ofrece una mejora que puede parecer insignificante para un lector, pero si consideramos que por ejemplo llegan un millón de solicitudes, al aplicar el algoritmo α se lograron realizar aproximadamente 3440 conexiones, con una carga de tráfico de 4000[Erlang], que originalmente se hubiesen bloqueado, sin aumentar el costo computacional del sistema general.
- Es oportuno recordar que el algoritmo de Sambo [18] fue propuesto originalmente en una red española de transporte [17] que posee 33 nodos y 55 enlaces con una distancia media de 80 [km] por enlace entre nodo, por lo tanto existe un total de 1056 enlaces que conectan los nodos de inicio X_n y nodo de término Y_m , donde n y m son valores enteros que van de 0 a 32, y que $n \neq m$. En cambio, la topología NSFNet presenta 14 nodos con un total de 182 conexiones posibles entre el nodo de inicio X_n y nodo de término Y_m , y 42 enlaces con distancias dispares que varían de cientos a miles de kilómetros. Un sistema multi banda presenta mejores resultados con respecto a trabajar en una sola banda en escenarios donde la cantidad de conexiones y caminos posibles sea muy grande. En ese sentido, lo importante es que el algoritmo α es capaz de superar al algoritmo de Sambo en el peor escenario posible de simulación.

En la figura 4.19 se observan los resultados de la simulación donde $D[\%] > 0$ y 4.20 se encuentran los resultados de la simulación donde $D[\%] < 0$. Ambas figuras presentan un quiebre en su comportamiento cuando la carga de tráfico ρ es mayor o igual a 2000[Erlang]. En el caso de la figura 4.19 el valor de $D[\%]$ deja de subir rápidamente y se comienza a estabilizar. En cambio, en la figura 4.20 el valor de $D[\%]$ disminuye hasta esa carga de tráfico, para luego aumentar paulatinamente. Esto sugiere que al considerar la carga de tráfico ρ como una variable, el algoritmo se debe dividir el cargas de tráfico bajas menores a 2000 [Erlang] y cargas de tráfico altas mayores a 2000[Erlang].

La Tabla 4.3 muestra los resultados para la topología de la red NSFNet cuando se utiliza el criterio de camino más corto entre sus nodos "Path 0". En columna de la tabla $M_\alpha[\%]$ se observa claramente lo previamente analizado, para cargas de tráfico menores a 2000[Erlang] la diferencia es clara con respecto a lo obtenido para cargas superiores a 2000[Erlang]. Además, como se analizó en el sub capítulo 4.2.1, las posibles combinaciones de banda que minimizan la probabilidad de bloqueo para las cargas de tráfico ρ 3500, 4000 y 4500 comienzan con la secuencia [E,S,L,C] y por el contrario, para las mismas cargas de tráfico, el valor de $D[\%]$ disminuye cuando la búsqueda comienza con [L,S,C,E] y [C,L,S,E]. Lo cual indica que un análisis previo a partir del histograma de las conexiones posibles de una red presenta una gran ayuda para determinar el orden de búsqueda de las bandas espectrales.

Al analizar cuales fueron las configuraciones de la segunda búsqueda en el mejor de los casos ocurre que en casi todos los escenarios la ultima banda que se analiza en el primer proceso de búsqueda, la cual se encuentra restringido por el umbral α , es la misma con la que comienza el proceso en la segunda búsqueda. Por ejemplo, en caso de 3000[Erlang] la primera búsqueda es [L,S,C,E] y la segunda búsqueda es [E,C,S,L],

por lo que termina y comienza ambos procesos buscando en la banda **E**. Lo mismo ocurre para todos los casos, excepto para cargas de tráfico muy bajas como lo son de 1000 y 500 [Erlang], en donde la probabilidad de bloqueo es muy bajo.

La variedad de valores que se obtienen para el valor del umbral α revela dos cosas: La primera es que utilizar un umbral como forma de distribución puede disminuir o aumentar la probabilidad de bloqueo de la red dependiendo del valor otorgado y la carga de tráfico. Por ejemplo, si el orden de búsqueda de la red es **[L,S,C,E][E,C,S,L]** para una carga de tráfico de 3000[Erlang] y un valor de $\alpha = 70$ [%] el valor de D [%] es máximo, tal como se aprecia en la columna M_α . Sin embargo, el mismo orden de red, pero cargas de tráfico de 3500 o 4000 [Erlang] y un valor de $\alpha = 10$ [%] el valor de D [%] es mínimo, tal como se aprecia en la columna m_α . Lo segundo que se puede obtener de la Tabla 4.3 es que a priori no se puede determinar que valor de umbral optimizará el proceso. Se especula que tiene relación directa con la capacidad en FSU de cada banda espectral.

La Tabla 4.3 no implica que al momento de implementar el algoritmo en un sistema real se deba cambiar el orden de búsqueda de bandas dependiendo de la carga de tráfico como se podría suponer. La tabla solo indica que existen combinaciones de bandas y umbral que maximizan y minimizan la probabilidad de bloque. A partir de la tabla, se puede trabajar a futuro pensando en como variar el umbral α con respecto a la carga de tráfico ρ con el fin de optimizar la probabilidad de bloqueo independientemente del orden de búsqueda de las bandas espectrales.

Tabla 4.3: Resultados de simulación que muestran el mejor orden de búsqueda de banda y el umbral α [%] obtenido, utilizando "Path"0 en diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.

ρ	Banda Max	α [%] Max	M_α %	Banda Min	α [%] Min	m_α %
100	CELS-CELS	100	0	CLSE-ESLC	50	-0.0003
500	CELS-CELS	100	0.0345	ESLC-ESLC	30	-0.6912
1000	LSEC-CESL	80	0.0721	ESLC-ESLC	30	-0.6701
1500	ESLC-CLSE	80	0.1569	ECLS-ECLS	20	-0.5324
2000	LSEC-CESL	70	0.3432	LSCE-ECSL	10	-0.5042
2500	LSEC-CESL	80	0.2721	CLSE-CLSE	20	-0.4692
3000	LSCE-ECSL	70	0.2303	CLSE-CLSE	20	-0.4170
3500	ESLC-CLSE	60	0.3025	LSCE-ECSL	10	-0.4969
4000	ESLC-CLSE	40	0.3446	LSCE-ECSL	10	-0.4681
4500	ESLC-CLSE	40	0.3158	CLSE-CLSE	10	-0.5385
5000	LSEC-CESL	70	0.2860	CLSE-CLSE	10	-0.4598

4.2.4.1. Distribución de las solicitudes en las bandas espectrales, NSFnet

En las Tablas 4.5 y 4.5 se presenta el uso total de la banda espectral en porcentaje para las diversas cargas de tráfico ρ . En la figura 4.21 y 4.22 se presenta la representación gráfica de ambas tablas.

En la figura 4.21 se aprecia que al aumentar la carga de tráfico a valores superiores a 1500[Erlang], el uso de la banda tiende a mantenerse dentro de un cierto rango. Por ejemplo, la banda S se mantiene alrededor del 10[%] de uso y la banda C varia su valor del 30[%] al 20[%] a medida que aumenta la carga de tráfico de 2500[Erlang] a 4000[Erlang]. Lo interesante de este gráfico es que todas las bandas tienden a presentar pocas o muy pequeñas variaciones con respecto a su uso, lo cual indica que para seleccionar un valor de umbral α se debe considerar mantener una regla con respecto a la cantidad de FSU disponibles con respecto a la carga de tráfico.

En la figura 4.22 se observa que no existe una uniformidad en el uso de las bandas espectrales. Por ejemplo, la banda C pasa de un uso menor al 10[%] para cargas de trafico menores a 2000[Erlang], pero cuando la carga de trafico es entre 2500 y 3000 [Erlang] el uso de esta banda pasa a ser mayor al 30[%], para luego volver a pasar a un uso del 10[%] para una carga de trafico de 4000[Erlang]. Como se aprecia en la figura, la única regla general que se puede deducir es que aparentemente no una relación correcta en el tamaño en FSU de las bandas entre dos cargas de trafico consecutivas. Ambas figuras entregan un indicio de la necesidad de que el valor de α sea variable con respecto a la carga de trafico y con respecto al uso de la banda espectral.

Tabla 4.4: Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la probabilidad de bloqueo más baja M_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.

ρ	C %	L %	S %	E %	Block %
100	86.44	0.02	0.00	13.54	0.0
500	67.09	3.56	3.28	22.99	3.09
1000	28.30	26.66	14.49	21.10	9.44
1500	28.08	12.61	12.31	33.10	13.90
2000	24.80	23.09	13.47	21.05	17.60
2500	29.01	16.17	12.12	22.01	20.70
3000	25.20	18.09	12.75	20.67	23.29
3500	22.66	10.83	11.51	29.68	25.32
4000	17.67	9.25	11.36	34.24	27.48
4500	17.38	9.39	11.12	32.63	29.48
5000	22.99	13.86	11.06	20.87	31.22

Tabla 4.5: Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la mayor probabilidad de bloqueo m_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red NSFNet.

ρ	C %	L %	S %	E %	Block %
100	74.33	17.56	6.99	1.12	0.00
500	2.56	4.28	10.93	78.41	3.81
1000	4.13	6.64	13.20	65.84	10.18
1500	7.97	6.87	6.57	63.85	14.75
2000	5.92	48.06	17.85	9.72	18.44
2500	35.04	17.94	13.40	12.18	21.44
3000	32.20	17.75	14.24	11.94	23.86
3500	5.79	38.07	17.46	12.57	26.12
4000	5.77	35.79	17.12	13.03	28.30
4500	29.71	17.02	12.81	10.12	30.33
5000	28.04	16.56	13.19	10.24	31.96

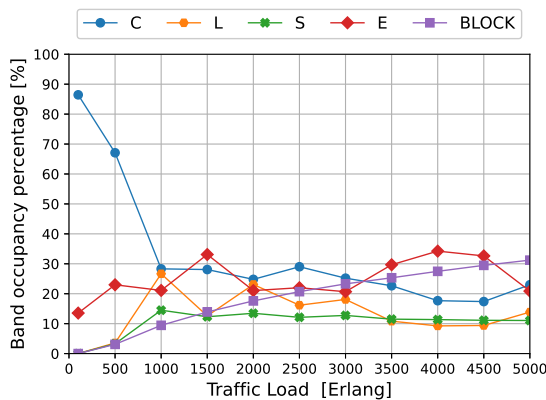


Figura 4.21: Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la mejor configuración de orden de búsqueda de banda M_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red NSFNet.

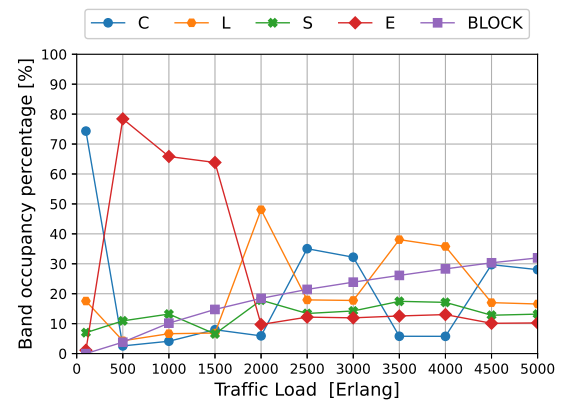


Figura 4.22: Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la peor configuración de orden de búsqueda de banda m_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red NSFNet.

4.3. Simulación red UKNet

Las simulaciones se realizan en la red United Kingdom Network (UKNet). La configuración de la topología se puede apreciar en la figura 4.23, la cual consta de 21 nodos y 78 enlaces. De manera similar a la red NSFNet, la red UKNet se puede considerar una red de gran tamaño, dado que los enlaces entre sus nodos se encuentran a cientos de kilómetros y abarca gran parte del territorio del reino unido. En los siguientes subcapítulos se analizará el criterio de camino de la red, se mostrarán los resultados de la simulación para un valor de umbral α constante y para un valor de carga de tráfico ρ constante, y se analizará la distribución de los mejores y peores resultados obtenidos de las simulaciones.

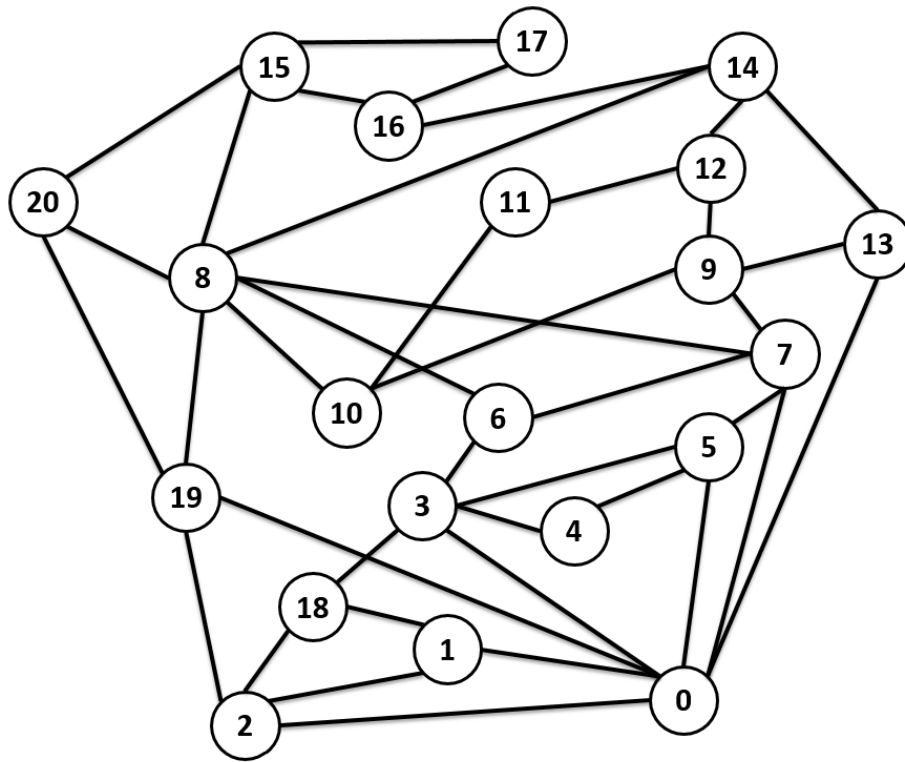


Figura 4.23: Topología de red de fibra óptica UKnet

4.3.1. Criterio de selección de Camino

El criterio de camino utilizado es el "Path 0", es decir la distancia más corta entre los nodos de inicio X_n y nodo de término Y_m , donde n y m son valores enteros que van de 0 a 20, y que $n \neq m$. En esta configuración existen un total de 420 enlaces que conectan todas posibilidades de combinación posible entre nodos. En la figura 4.24 se aprecia un histograma de todas las distancias posibles en los enlaces para el camino elegido. En la figura 4.25 se observa la relación del formato de modulación para cada una de las bandas espectrales con respecto a la distancia de separación entre los enlaces, ajustando el rango del eje horizontal para coincidir con la figura 4.24. Al estudiar el histogramas y las limitaciones físicas de las bandas espectrales de forma simultanea se puede realizar el siguiente análisis:

- **Situación:** En la figura 4.24 se aprecia el histograma del total de los caminos posibles utilizando el criterio de la ruta más corta entre nodos *Path 0*. La figura tiene la siguiente interpretación: El promedio de la distancia entre los enlaces de 289[km] y la distancia máxima entre enlaces es de 760[km].
- **Criterio del algoritmo de Sambo:** Este algoritmo busca optimizar el formato de modulación a partir del orden de banda [C,L,S,E] y utilizando una lógica de desborde:
 - Considerando que la búsqueda comienza con la banda C, entonces la mayor parte de la modulación para las distancias menores al promedio es 64-QAM, pero a distancias muy cortas es posible llegar a utilizar 256-QAM.
 - Dado que se pueden utilizar las bandas [C,L] para todos los enlaces, lo mas probable es que el formato de modulación promedio sea de 32-QAM.
 - Las bandas [S,E] son las últimas en ser recorridas y dadas las características de esta red lo más probable trabajen a una modulación de 16-QAM o 8-QAM.
- **Criterio del algoritmo propuesto α :** Se seleccionara un orden de búsqueda de banda espectral y se utiliza un umbral para distribuir la información.
 - Al observar el histograma es evidente que es posible transmitir la solicitud en todas las bandas espectrales, independientemente del enlace seleccionado.
 - La primera banda por la que se debe realizar la búsqueda puede ser la banda E por ser la que presenta el mayor ancho espectral en FSU o la banda L la cual presenta la mejor relación alcance vs formato de modulación.
 - Si se selecciona primero la banda E:
 - ◊ En este caso se prioriza el ancho de banda disponible. Para enlaces de corto alcances es posible utilizar una modulación de 64-QAM.
 - ◊ Para enlaces menores a la distancia promedio el formato de modulación sera de 32-QAM.

- ◊ Dado que se prioriza el ancho de banda sobre la relación distancia vs formato de modulación, la última banda debe ser la banda **L**.
- ◊ Siguiendo la prioridad de esta elección, la segunda banda es la **S** y la tercera debe ser la **C** con formatos de modulación promedio de 32-QAM y 16-QAM-
- ◊ El posible orden de búsqueda que optimiza las bandas es el siguiente: **[E,S,C,L]**
- ◊ Dadas las características de las bandas **L** y **C** es posible que la combinación óptima sea: **[E,S,L,C]**
- Si se selecciona primero la banda **L**:
 - ◊ En este caso se prioriza la relación distancia de enlace vs formato de modulación.
 - ◊ Para distancias cortas es posible obtener modulación de hasta 256-QAM.
 - ◊ El formato de modulación promedio dentro de la banda **L** es de 64-QAM.
 - ◊ Existe una relación directa entre el formato de modulación y el tamaño del ancho de banda utilizado, en la segunda se debe buscar en la banda **S** o **C**.
 - ◊ Dadas las condiciones, el orden de búsqueda que se busca es: **[L,S,C,E]**
 - ◊ Si se considera que para distancias superiores a 400[km] la banda **E** presenta limitaciones con respecto a su modulación.
 - ◊ Se debe estar seguro que se trabaja con el mayor orden de formato de modulación. Por lo que es posible que dejar a la banda **E** como última opción de búsqueda no genere los mejores resultados.
 - ◊ Es posible que las combinaciones que se deban utilizar sea una de las siguientes: **[L,S,E,C]** o **[L,C,E,S]**.

A partir del análisis de los resultados esperados del criterio de camino para considerando el algoritmo de Sambo y el algoritmo propuesto α se llega a las siguientes posibles combinaciones de orden de banda: **[C,L,S,E]** a partir de Sambo, **[E,S,C,L]**, **[E,S,L,C]**, **[L,S,C,E]** y **[L,C,E,S]**. En este trabajo no se simuló las combinaciones que comienzan por el orden **[E,S,C,L]** y **[L,C,E,S]**, dado que el criterio original de este trabajo se basó en la aplicabilidad del algoritmo, el alcance máximo de la banda espectral y el ancho de banda de cada banda espectral.

Los resultados de la propuesta dada por Sambo **[C,L,S,E]** se puede apreciar en la figura 4.26, y se puede prever que presenta resultados similares a la propuesta de búsqueda **[L,S,C,E]**, esto sucede por que al observar la figura 4.24 la mayoría de las conexiones se encuentran dentro del rango físico de las bandas espectrales. Por lo tanto, en caso de que la solución óptima de orden de banda sea **[L,S,C,E]** es posible que la mejora porcentual sea insignificante.

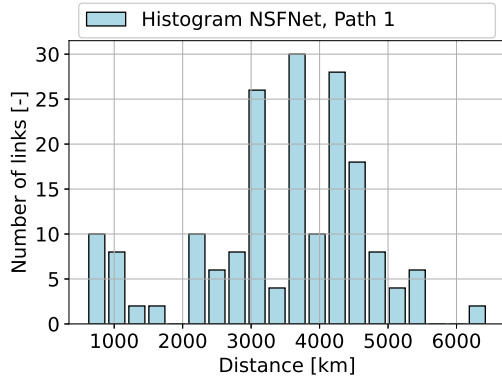


Figura 4.24: Histograma de la distancia de todos los enlaces posibles de la red UKNet, Path 0.

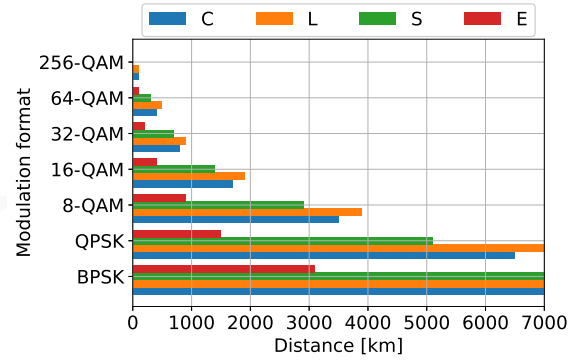


Figura 4.25: Formatos de modulación vs alcance máximo del enlace por banda [km].

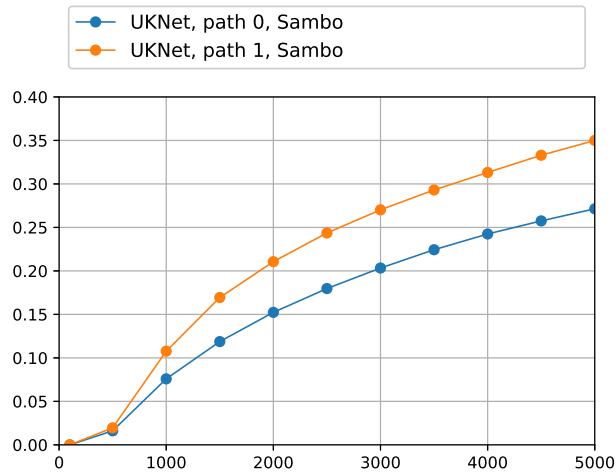


Figura 4.26: Probabilidad de bloqueo de la red UKNet al utilizar el algoritmo de Sambo con "Path"0 y "Path"1.

4.3.2. Resultados de simulación: umbral α constante

En las figuras 4.27 a 4.32 se pueden observar los resultados de la simulación para 8 órdenes de banda y un valor de umbral α variable. En las figuras se observa claramente que para casi todos los umbral de separación y orden de búsqueda de banda espectral, los resultados obtenidos de D [%] para esta topología son generalmente peores a la referencia dada por el algoritmo de Sambo.

En el sub capítulo 4.3.1 se explica la posibilidad de que los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo α en la red UKNet al utilizar el criterio de camino mas corto entre nodos *Path 0* no sean prometedores con respecto a la disminución de la probabilidad de bloqueo de la red. La razón principal es que al analizar la solución propuesta por Sambo desde el punto de vista de la solución propuesta por el algoritmo α , se llega a que el orden sugerido de banda es muy similar o prácticamente el mismo.

A pesar de que se los resultados de las simulaciones no son significativos para esta topología es posible analizar ciertos fenómenos que se observan y que coinciden con los analizados en el sub capítulo 4.2.2:

- En la figura 4.7 en donde el valor de $\alpha = 0$ [%] y en la figura 4.12 en donde el valor de $\alpha = 100$ [%] se presentan variaciones en el valor de D [%] muy pequeñas. Esto ocurre porque todos los enlaces posibles están dentro del límite físico de las bandas, por lo que en este tipo de situaciones no es necesario distribuir las solicitudes como lo hace el algoritmo propuesto α .
- Se observa que en las figuras 4.28 a 4.31 el valor de D [%] comienza a aumentar a partir de una valor de trafico de carga ρ de entre 1000 a 1500 [Erlang]. Este comportamiento también se logra distinguir en la red NSFNet, por lo que se puede asumir que el algoritmo α obtiene mejores resultados cuando la carga de trafico es alto.

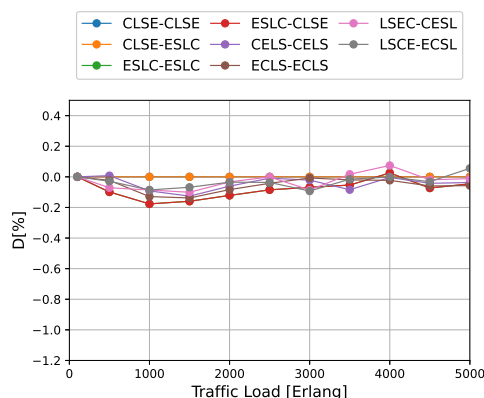


Figura 4.27: Resultados simulación utilizando la red UKNet, *Path=0* y $\alpha = 0$ [%]

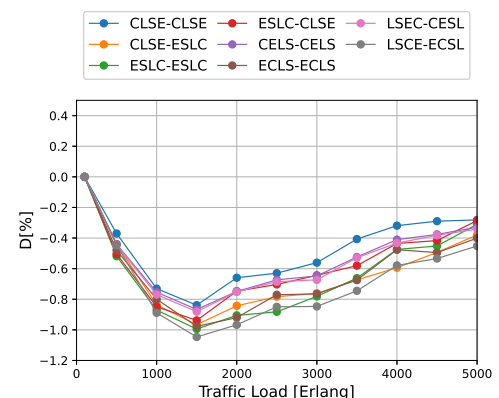


Figura 4.28: Resultados simulación utilizando la red UKNet, *Path=0* y $\alpha = 20$ [%]

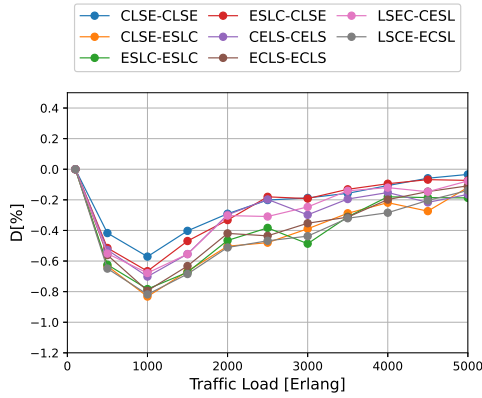


Figura 4.29: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 40$ [%]

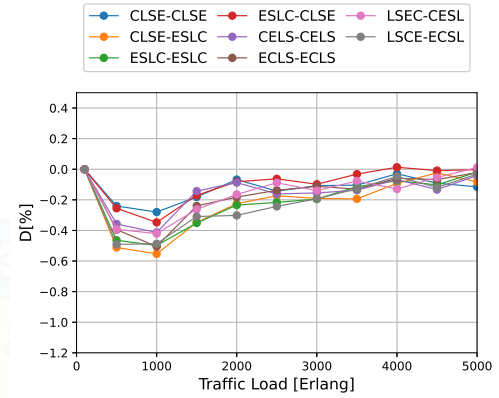


Figura 4.30: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 60$ [%]

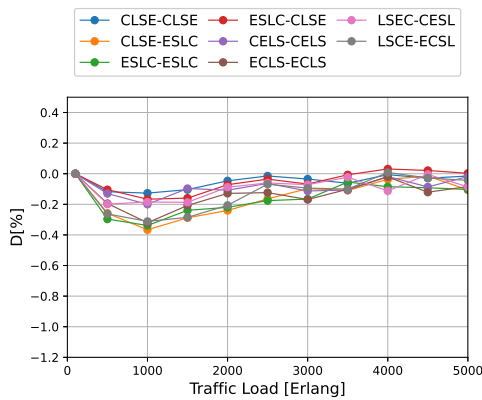


Figura 4.31: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 80$ [%]

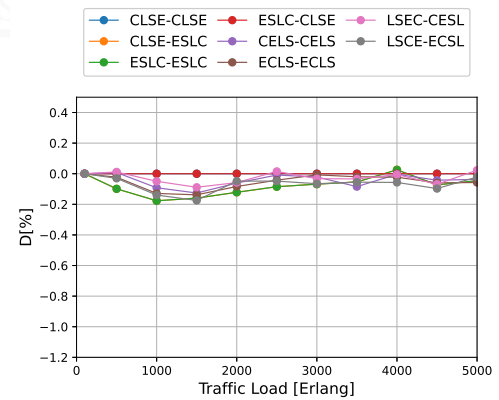


Figura 4.32: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\alpha = 100$ [%]

4.3.3. Resultados de simulación: umbral ρ constante

Se realiza el análisis de los resultados de la simulación de la topología de red UKNet, pero se considera el tráfico de carga ρ constante para este estudio:

- En las figuras 4.34 a 4.38 se observa que el crecimiento de D [%] tiene un crecimiento logarítmico y se aprecian leves oscilaciones en su crecimiento
- En las figura 4.37 y 4.38 ocurre un quiebre cuando el valor de $\alpha = 40$ [%], lo cual implica directamente que para altas cargas de tráfico la distribución de las solicitudes por las bandas puede disminuir la probabilidad de bloqueo.
- En las figuras 4.34 a 4.38 existe un mínimo alrededor del valor $\alpha = 20$ [%]. No se tiene una explicación exacta para este comportamiento.

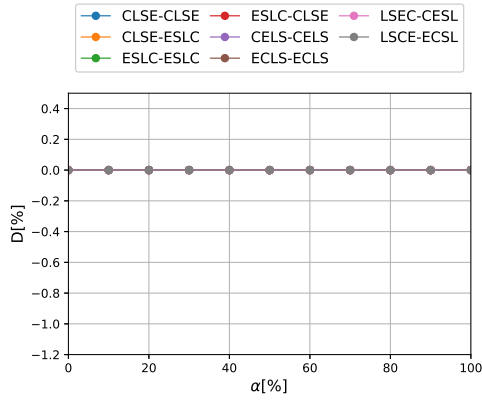


Figura 4.33: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 100$ [Erlang]

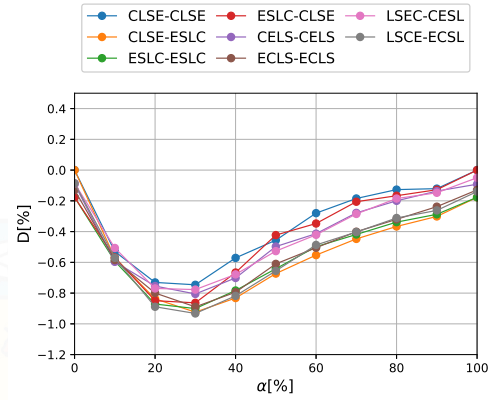


Figura 4.34: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 1000$ [Erlang]

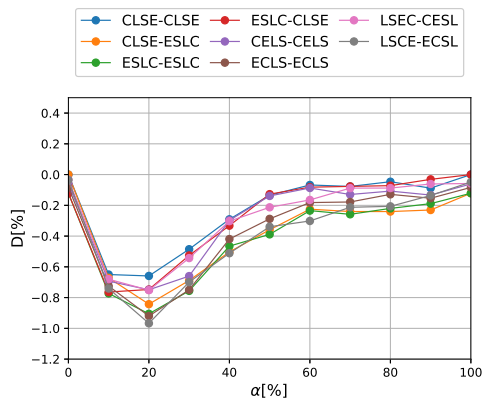


Figura 4.35: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 2000$ [Erlang]

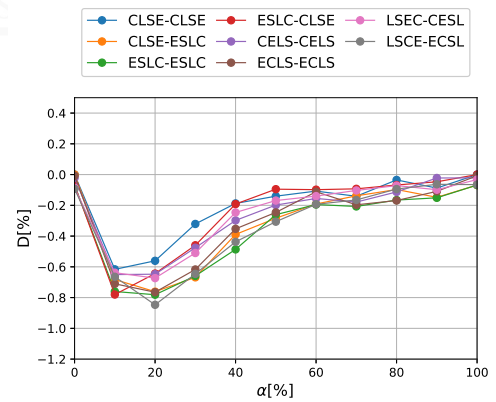


Figura 4.36: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 3000$ [Erlang]

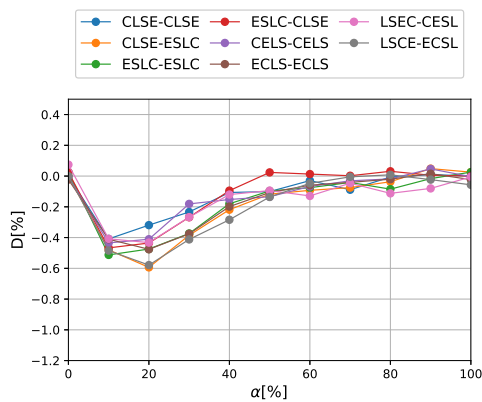


Figura 4.37: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 4000$ [Erlang]

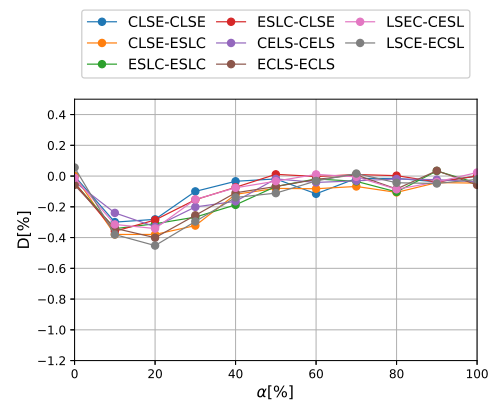


Figura 4.38: Resultados simulación utilizando la red UKNet, Path=0 y $\rho = 5000$ [Erlang]

4.3.4. Distribución de los resultados UKNet

Al realizar las simulaciones en la red UKNet se puede obtener el valor de D [%] que maximice y minimice las diferencias porcentuales al utilizar dos criterios de caminos distintos (ver figuras 4.39 y 4.40). De forma similar, se logra obtener la relación entre el orden de búsqueda de banda espectral, umbral α y carga de tráfico ρ en el cual el valor de D [%] es máximo y mínimo (ver Tabla 4.6)

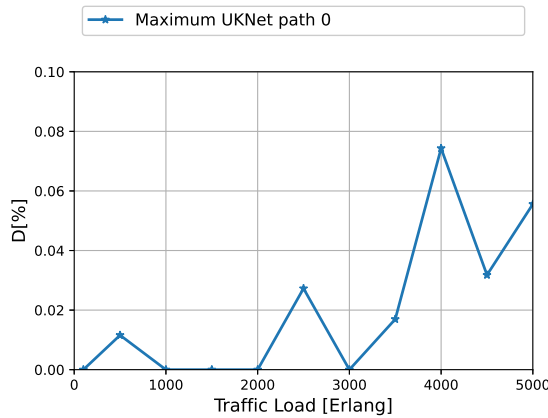


Figura 4.39: Diferencia porcentual máxima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α [%] para diferentes decisiones de rutas para UKNet

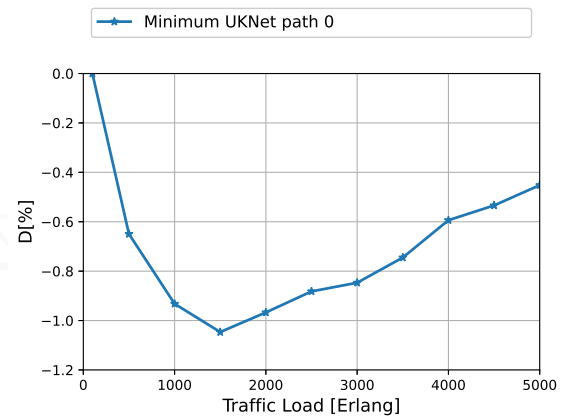


Figura 4.40: Diferencia porcentual mínima entre la propuesta de Sambo y el algoritmo propuesto α [%] para diferentes decisiones de rutas para UKNet

En la figura 4.39 que es posible disminuir la probabilidad de bloqueo en la red UKNet al variar el orden de banda y utilizar un umbral α . En la figura se observa que para tráficos de carga menores a 2000[Erlang] el aumento de D [%] es ínfimo y que para cargas mayores a 3000[Erlang] se logran resultados apreciables, pero de forma similar son ínfimos. Los resultados que se pueden distinguir en la figura 4.39 se pueden atribuir directamente a la relación del criterio del camino seleccionado y las dimensiones físicas de la topología utilizada. En este caso al tener todos los enlaces posibles dentro del alcance de todas las bandas espectrales, es un resultado esperable que la mejora sea pequeña.

En la figura 4.40 se observa claramente la disminución del valor de D [%]. En la figura queda plasmado que existe un quiebre en la carga de tráfico $\rho = 1500$ [Erlang], tal como se comentó en el sub capítulo 4.3.3. Para cargas de tráfico menores a 1500[Erlang] el valor de D [%] disminuye en picada y para valores mayores al punto de quiebre, el valor de D [%] comienza a aumentar con cierta linealidad. Lo interesante del fenómeno observado en la figura 4.40 es que se aprecia de forma simultánea en la figura 4.20, aunque en esta última no presenta una curva tan evidente.

En la Tabla 4.6 se tienen las combinaciones de banda y valor de umbral α obtenidos en las simulaciones de la red UKNet utilizando el criterio *Path 0*. En la tabla se aprecia que para cargas de tráfico mayores a 2000[Erlang] la combinación de bandas que minimizan la probabilidad de bloqueo son las combinaciones

[C,L,S,E], [E,S,L,C] y [L,S,E,C], las cuales corresponden a las combinaciones deducidas en el sub capítulo 4.3.1. Además, el valor del umbral α con el cual se alcanzan mejores resultados para D [%] tiende a ser 0 y 100, por lo que se realiza únicamente el primer proceso de búsqueda de banda o el segundo respectivamente.

En la Tabla 4.6 se logra distinguir que para cargas de tráfico mayores a 2000 [Erlang] el umbral α con el que el valor de D [%] disminuye es uniformemente 20 [%]. Como se comento con anterioridad, no se tiene una respuesta exacta que explica este comportamiento. Se especula que ocurre por la relación entre el largo de los enlaces y la capacidad total de la banda.

Tabla 4.6: Resultados de simulación que muestran el mejor orden de búsqueda de banda y el umbral α [%] obtenido, utilizando "Path"0 en diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.

ρ	Banda Max	α [%] Max	M_α %	Banda Min	α [%] Min	m_α %
100	LSEC-CESL	100	0	ECLS-ECLS	50	-0.000421
500	LSEC-CESL	100	0.0115	LSCE-ECSL	40	-0.649
1000	ESLC-CLSE	100	0	LSCE-ECSL	30	-0.932
1500	ESLC-CLSE	100	0	LSCE-ECSL	20	-1.046
2000	ESLC-CLSE	100	0	LSCE-ECSL	20	-0.967
2500	ESLC-CLSE	90	0.0272	ESLC-ESLC	20	-0.882
3000	ESLC-CLSE	100	0	LSCE-ECSL	20	-0.847
3500	LSEC-CESL	0	0.0169	LSCE-ECSL	20	-0.745
4000	LSEC-CESL	0	0.0743	CLSE-ESLC	20	-0.594
4500	ESLC-CLSE	70	0.0317	LSCE-ECSL	20	-0.534
5000	LSCE-ECSL	0	0.0556	LSCE-ECSL	20	-0.452

4.3.4.1. Distribución de las solicitudes en las bandas espectrales, UKNet

En las Tablas 4.7 y 4.8 se presenta el uso total de la banda espectral en porcentaje para las diversas cargas de tráfico ρ . En la figura 4.41 y 4.42 se presenta la representación gráfica de ambas tablas.

En la figura 4.41 se observa que en el tramo entre 3500 y 4000[Erlang] ocurre una discontinuidad en el uso porcentual de las bandas **C** y **L**, esto ocurre por el orden de banda y umbral α utilizado en este tramo. Sin embargo, dado el histograma de la red estudiado en el sub capítulo 4.3.1, las limitaciones físicas de las bandas **C** y **L**, y los valores de $D[\%]$ en este tramo, es posible cambiar el orden de banda en estos tramos de **[L,S,E,C]** a **[C,S,E,L]** y los resultados porcentuales tendrán un comportamiento mucho mas lineal. Al realizar el cambio se podría deducir que ocurren dos fenómenos: La mayor parte de las solicitudes se realiza en la misma banda. De forma similar a lo analizado en el sub capítulo 4.2.4.1, los valores porcentuales de uso de las bandas se mantiene dentro de ciertos rangos a medida que varia la carga de tráfico.

En la figura 4.42 se aprecia que para cargas de tráfico menores a 2000[Erlang] el uso en porcentaje de las bandas se encuentra muy disperso. En cambio, para valores de carga de tráfico mayores a 3000[Erlang] las variaciones del uso de la banda tienden ser más acotadas. Se estima que esto ocurre ya que se acercan a un valor de $D[\%] = 0$, tal como se aprecia en la figura 4.40.

Tabla 4.7: Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la probabilidad de bloqueo más baja $M_\alpha[\%]$, utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.

ρ	C %	L %	S %	E %	Block %
100	84.22	0.0064	1.041	14.725	0
500	70.81	1.6706	4.603	21.30	1.6028
1000	61.69	14.18	9.654	6.883	7.588
1500	55.30	15.55	9.799	7.467	11.87
2000	50.49	16.26	10.05	7.94	15.233
2500	39.59	16.64	11.19	14.62	17.94
3000	43.85	16.70	11.08	8.0216	20.33
3500	1.981	47.59	17.71	10.28	22.41
4000	1.950	45.35	17.94	10.57	24.16
4500	27.99	14.89	12.37	19.01	25.71
5000	4.553	41.78	17.62	8.949	27.08

Tabla 4.8: Resultados de simulación que muestran el porcentaje de utilización de la banda cuando se considera la mayor probabilidad de bloqueo m_α [%], utilizando el "Path"0 a diferentes cargas de tráfico para la topología de red UKFNet.

ρ	C %	L %	S %	E %	Block %
100	5.233	3.414	2.491	88.85	0.00042
500	6.262	54.74	20.67	16.051	2.263
1000	7.198	48.12	18.44	17.70	8.520
1500	8.314	47.57	17.56	13.63	12.91
2000	8.666	42.66	16.37	16.10	16.20
2500	5.636	7.543	12.42	55.53	18.85
3000	8.131	35.67	15.98	19.03	21.17
3500	8.267	33.37	15.68	19.50	23.17
4000	28.93	13.46	11.03	21.73	24.83
4500	8.085	29.97	15.34	20.31	26.28
5000	7.761	28.55	14.98	21.10	27.59

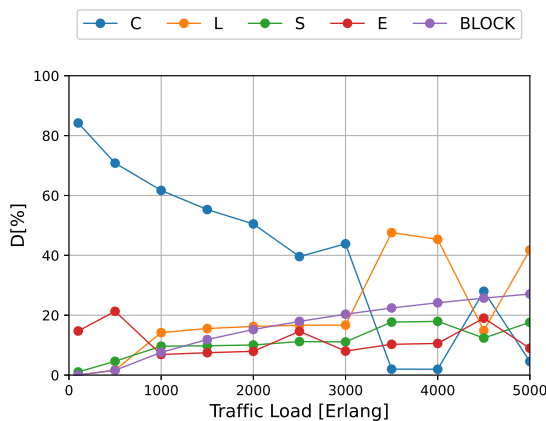


Figura 4.41: Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la mejor configuración de orden de búsqueda de banda M_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red UKFNet.

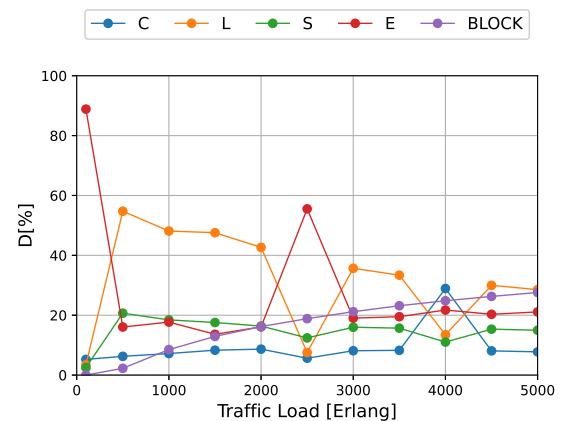


Figura 4.42: Distribución de la ocupación de banda de las diferentes Bandas considerando la peor configuración de orden de búsqueda de banda m_α [%] para diferentes cargas de tráfico en la topología de red UKFNet.

5 | Conclusión

Este trabajo propone un nuevo algoritmo para el problema de asignación de enrutamiento, formato de modulación, banda y espectro (RMBSA) que, basado en la distribución de las solicitudes de conexión a la red en varias bandas espectrales, disminuye la probabilidad de bloqueo para redes ópticas elásticas multibanda (MB-EON).

La propuesta de solución para la disminución de la probabilidad de bloqueo en redes ópticas multibanda estudiado en este trabajo presenta tres novedades principales. En primer lugar, utiliza tablas del peor escenario posible para obtener el mejor formato de modulación, teniendo en cuenta el alcance máximo del trayecto elegido [15]. Esto evita el uso de modelos analíticos para calcular la OSNR y BER de cada comunicación como lo hacen en [18]. En segundo lugar, se introduce un umbral duro, denominado α , para limitar la búsqueda de una banda disponible en relación con la disponibilidad de ancho de banda espectral; a la propuesta se le denominó algoritmo α . Por último, la tercera novedad consiste en modificar el orden de búsqueda de las bandas espectrales (en la primera y en la segunda búsqueda en el algoritmo α) para distribuir el uso de la banda y disminuir la probabilidad de bloqueo de las conexiones.

Los resultados de las simulaciones demuestran que al trabajar en un escenario de redes ópticas multibanda, distribuir las solicitudes por todas las bandas disponibles efectivamente disminuye la probabilidad de bloqueo de la red óptica. Se utilizó como referencia el algoritmo propuesto por Sambo [18] el cual distribuye las solicitudes de conexión utilizando una lógica de desborde, en otras palabras la condición para cambiar la banda espectral seleccionada para solicitud es que la banda no tenga espacio espectral en FSU disponible para realizar la conexión. Se buscó cambiar el paradigma de la lógica del cambio de banda a partir de un umbral duro que determina cuanta capacidad espectral porcentual puede alcanzar una banda antes de buscar en la siguiente banda disponible. Se demostró distribuir la información a partir de diversos umbrales efectivamente puede disminuir la probabilidad de bloqueo, pero que el valor del umbral depende directamente de la red óptica que se encuentre en estudio, la carga de tráfico a la cual se somete el sistema y al orden de búsqueda de las bandas espectrales.

El trabajo demuestra con sus resultados que al modificar el orden de búsqueda de las bandas espectrales influye directamente en el valor de la probabilidad de bloqueo. En la actualidad el orden de búsqueda de las

bandas se basa principalmente en las capacidades tecnológicas, lo cual se puede ver reflejado directamente en la propuesta realizada por Sambo [18]. Al considerar un escenario donde la capacidad tecnológica no es un limitante, en otras palabras se tiene un acceso comercial a las bandas [C,L,S,E], el orden de ejecución de las solicitudes pasa a ser uno de los parámetros que se deben optimizar. En el trabajo se muestran diversos criterios de búsqueda los cuales dependen del tipo de red óptica en la cual se trabaja, el umbral que determina la distribución de las solicitudes por el espectro y la carga de tráfico a la cual se somete el sistema.

La solución propuesta utiliza diversas tablas tabuladas en [15] para determinar el mayor orden de modulación dependiendo de cada escenario estudiado. El uso de tablas disminuye el tiempo en el proceso de búsqueda de asignación de solicitudes, a diferencia del trabajo que se utiliza como referencia el cual calcula un modelo heurístico. Se considera que los ciclos de búsqueda que presenta el algoritmo, al tener muy pocas iteraciones, tienen muy poca influencia en su complejidad computacional. El algoritmo propuesto presenta una naturaleza casi lineal, por lo que su complejidad computacional es $O(n * \log(n))$, donde el tiempo de computo aumenta a partir de 10^7 solicitudes.

Los resultados de este trabajo indican que existe por lo menos una combinación que optimiza los parámetros de umbral α , orden de búsqueda de banda, carga de tráfico ρ , camino de conexión de una solicitud, la distancia máxima de separación entre nodos y topología de red óptica que minimiza la probabilidad de bloqueo de una red óptica. En consecuencia se considera que a priori es imposible determinar un valor que optimice las seis variables en un escenario multibanda, pero de igual manera se determina que existe un parámetro que optimiza todas las variables. Este nuevo parámetro depende directamente de todas las variables presentes en este trabajo y la única forma de determinar este valor es a partir de una búsqueda exhaustiva por varias topologías y combinaciones de variables.

Finalmente, este trabajo presentó un algoritmo que cumple los requisitos para ser implementado industrialmente. Considerando un escenario donde se tiene a disposición todas las bandas espectrales, la solución propuesta presenta: Un coste económico insignificante dado que no es necesario modificar el sistema físico para su implementación; Bajo nivel de entrada tecnológico, ya que el concepto de umbral, distribución y búsqueda de bandas se consideran de bajo nivel para los profesionales de la industria de comunicaciones; La complejidad computacional se considera de bajo nivel al ser de naturaleza $O(n * \log(n))$. La solución propuesta cumple con los estándares para ser aplicados directamente en la industria, ya que efectivamente disminuye la probabilidad de bloqueo y de forma simultánea no complejiza demasiado los sistemas de toma de decisión que se utilizan actualmente.

6 | Anexo: Trabajos futuros

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizó un umbral duro α para forzar la distribución de las solicitudes en todo el espectro disponible. A partir de los resultados, se obtuvo que existen diversos umbrales y combinaciones de búsqueda de bandas que efectivamente disminuyen la probabilidad de bloque de una red óptica. A partir de los resultados, se concluyó que el camino elegido es una variable que se debe tener en consideración al momento de desarrollar el algoritmo y que su variación puede cambiar de forma significativa los resultados obtenidos. Considerando lo anterior, los siguientes pasos para optimizar el algoritmo α son los siguientes, se debe determinar:

- ¿Por que las combinaciones resultantes de umbral α y combinaciones de banda optimizar la probabilidad de bloqueo dado una carga de tráfico específica?
- Considerando que los criterios del umbral α y el orden de banda cambian con respecto a la carga de tráfico ¿Es posible determinar un criterio suave que modifique ambos parámetros de forma simultánea con el objetivo de minimizar la probabilidad de bloqueo de la red?

Para responder ambas interrogantes se deben analizar los resultados obtenidos de estos experimentos. Durante las simulaciones se adquirió la evolución de la asignación de las bandas durante todo el experimento. Esto significa que para todos los ordenes de banda y umbrales α es posible hacer un seguimiento de cuando cambiaron de banda para todos los casos estudiados sin la necesidad de repetir los experimentos.

Con la información a disposición se puede hacer una hipótesis sobre cuando deben cambiar las bandas para disminuir la probabilidad de bloqueo. Para determinar la veracidad de esta hipótesis se puede analizar los casos extremos donde la probabilidad de bloqueo se minimiza y maximiza para una carga de tráfico en específico y compáralos con la referencia dada por [18], como se ve en las Tablas 6.2, 6.3 y 6.1 respectivamente.

En las tablas se puede ver la cantidad de veces que se utilizó la misma banda de forma consecutiva, siendo i las bandas anteriores y j las bandas actuales, por ejemplo en la Tabla 6.2 cuando se asignó la solicitud en la banda B_1 ocurrió un total de 56999 veces que la siguiente asignación también se realizó en la banda B_1 , pero ocurrió un total de 6733 veces que no encontró espacio en la banda B_1 y la solicitud debió ser asignada a

la banda B_2 .

El objetivo de analizar estos datos es lograr encontrar un patrón que nos permita flexibilizar el algoritmo propuesto α para la red NSFNet y eventualmente expandirlo a otras topologías.

Tabla 6.1: Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que se utiliza como referencia, la probabilidad de bloqueo: Orden de banda CLSE-CLSE, $\alpha = 100$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]

i, j	1	2	3	4	5	6	7	8	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	114922	47492	32793	29841	87247
6	0	0	0	0	47786	20729	13224	12465	36334
7	0	0	0	0	32870	13900	9507	8193	24615
8	0	0	0	0	29949	12332	8740	8276	22252
9	0	0	0	0	86768	36085	24821	22774	66085

Tabla 6.2: Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que maximiza la probabilidad de bloqueo: Orden de banda ESLC-CLSE, $\alpha = 40$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]

i, j	1	2	3	4	5	6	7	8	0
1	56999	6733	2747	1310	37337	17540	17935	18625	60242
2	6865	944	293	153	4613	2151	2165	2252	7366
3	2790	350	195	57	1764	841	831	856	2921
4	1331	168	71	46	855	378	418	404	1369
5	37685	4563	1757	879	24812	11451	11868	12046	40274
6	17571	2114	893	413	11690	5729	5329	5599	18818
7	18029	2271	862	428	12092	5534	5814	5584	19040
8	18344	2241	908	409	12201	5615	611	6294	19072
0	59855	7419	2879	1345	39971	18916	19183	19535	64566

Tabla 6.3: Suma total de ocasiones en donde la banda previa i es igual a la banda actual j . Escenario que minimiza la probabilidad de bloqueo: Orden de banda LSCE-ECSL, $\alpha = 10$, $Path = 0$, $\rho = 4000$ [Erlang]

i, j	1	2	3	4	5	6	7	8	0
1	106725	46719	15389	17477	21311	1790	4471	1169	85266
2	46981	21117	6913	7778	9471	769	1999	516	37287
3	15394	7077	2102	2582	3010	196	635	171	42526
4	17466	7771	2593	3038	3419	291	734	193	14045
5	21773	9354	3014	3484	4411	295	802	2231	7025
6	1727	769	259	266	357	37	66	14	1345
7	4359	2020	630	733	919	99	262	46	3548
8	1184	470	188	192	229	23	72	16	887
0	84709	37536	12605	13999	17254	1340	3573	913	67998

Las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3 pueden ser representadas como mapas de calor en las figura 6.1, 6.2 y 6.3 que presentan el mapa de calor de la referencia, M_α y m_α respectivamente. En las figuras se puede apreciar de forma sencilla la distribución que de elección de bandas.

Considerando las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, se puede intuir que: se puede obtener un modelo matemático que determine el orden de búsqueda dentro de las bandas en función del espacio disponible, la carga de tráfico y la ubicación previa de asignación. Se puede obtener dicho modelo a partir de los resultados de esta tesis y se puede extender para que sea independiente del número de bandas.

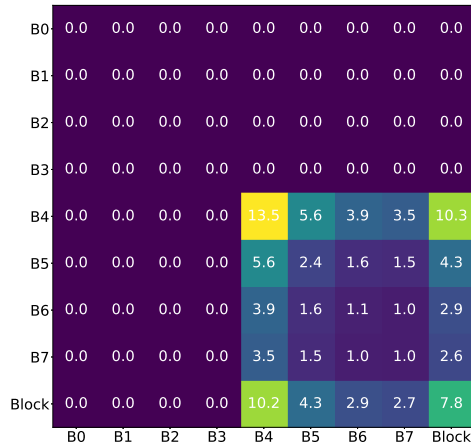


Figura 6.1: Mapa de calor Referencia

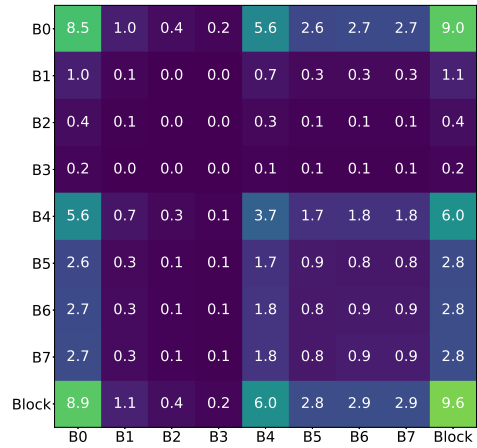


Figura 6.2: Mapa de calor M_α

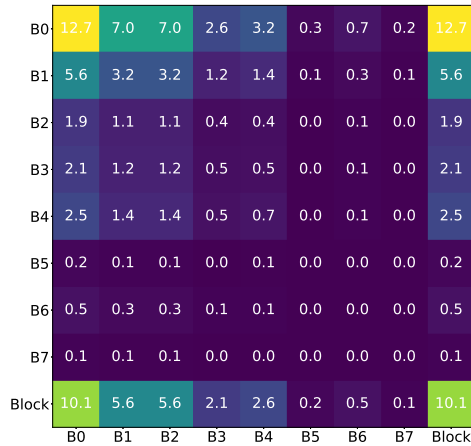


Figura 6.3: Mapa de calor m_α

Bibliografía

- [1] International Telecommunication Union- Telecommunication Standardization Sector (ITU-T). *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, Recommendation G.694.1*. Oct. de 2020.
- [2] Yunping Bai et al. “High Modulation Efficiency and Dynamic Range Optical Single Sideband Modulation Without Gain Penalty in Nonlinear Distortion Suppression”. En: *Journal of Lightwave Technology* 39.24 (2021), págs. 7940-7947. doi: [10.1109/JLT.2021.3096654](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3096654).
- [3] Jorge Bermúdez, Reinaldo Vallejos y Nicolás Jara. “A Bandwidth-Balanced RMLSA Solution for Static Elastic Optical Network: A Two Stages Approach”. En: *IEEE Access* 10 (2022), págs. 80092-80105. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3188989](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188989).
- [4] F. Calderón et al. “Heuristic Approaches for Dynamic Provisioning in Multi-Band Elastic Optical Networks”. En: *IEEE Communications Letters* 26.2 (2022), págs. 379-383. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3132054](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3132054).
- [5] Felipe Ignacio Calderón et al. “BER-Adaptive RMLSA Algorithm for Wide-Area Flexible Optical Networks”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 128018-128031. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3008883](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008883).
- [6] Ning Deng et al. “Challenges and Enabling Technologies for Multi-Band WDM Optical Networks”. En: *Journal of Lightwave Technology* 40.11 (2022), págs. 3385-3394. doi: [10.1109/JLT.2022.3162725](https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3162725).
- [7] David J. DiGiovanni. “Optical Fibers: Challenges and Opportunities in SDM”. En: *2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. 2020, págs. 1-2.
- [8] Felipe Falcón, Gonzalo España Herrera y Danilo Bórquez-Paredes. *Flex Net Sim: A Lightly Manual*. Mayo de 2021.
- [9] Alessio Ferrari, Emanuele Virgillito y Vittorio Curri. “Band-Division vs. Space-Division Multiplexing: A Network Performance Statistical Assessment”. En: *Journal of Lightwave Technology* 38.5 (2020), págs. 1041-1049. doi: [10.1109/JLT.2020.2970484](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2970484).
- [10] Alessio Ferrari, Emanuele Virgillito y Vittorio Curri. “Networking merit of spatial-division and band-division multiplexing: A statistical assessment”. En: *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2020, págs. 1-4. doi: [10.1109/ICTON51198.2020.9203172](https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203172).
- [11] Viacheslav V. Ivanov et al. “Effective Area Tilt Impact In S+C+L Band Long-Haul Fiber Optic Transmission Systems”. En: *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2022, págs. 01-03.
- [12] V. López y L. Velasco. *Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control*. Springer International Publication Switzerland, 2016.
- [13] Patricia Morales et al. “Multi-band Environments for Optical Reinforcement Learning Gym for Resource Allocation in Elastic Optical Networks”. En: *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. 2021, págs. 1-6. doi: [10.23919/ONDM51796.2021.9492435](https://doi.org/10.23919/ONDM51796.2021.9492435).
- [14] Antonio Napoli et al. “Towards multiband optical systems”. En: ene. de 2018, NeTu3E.1. doi: [10.1364/NETWORKS.2018.NeTu3E.1](https://doi.org/10.1364/NETWORKS.2018.NeTu3E.1).
- [15] Esteban Paz y Gabriel Saavedra. *Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing*. Nov. de 2020.
- [16] David Richardson. “Filling the Light Pipe”. En: *Science* 330 (oct. de 2010), págs. 327-328. doi: [10.2307/40931602](https://doi.org/10.2307/40931602).
- [17] N. Sambo et al. “Distributed setup in optical networks with flexible grid”. En: *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*. 2011, págs. 1-3.

- [18] Nicola Sambo et al. "Provisioning in Multi-Band Optical Networks". En: *Journal of Lightwave Technology* 38.9 (2020), págs. 2598-2605. doi: [10.1109/JLT.2020.2983227](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2983227).
- [19] C.E. Shannon. "Communication in the Presence of Noise". En: *Proceedings of the IRE* 37.1 (1949), págs. 10-21. doi: [10.1109/JRPROC.1949.232969](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969).
- [20] Nour El Din El Sheikh et al. "Multi-band provisioning in dynamic elastic optical networks: a comparative study of a heuristic and a deep reinforcement learning approach". En: *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. 2021, págs. 1-3. doi: [10.23919/ONDM51796.2021.9492334](https://doi.org/10.23919/ONDM51796.2021.9492334).
- [21] Yan Sun et al. "Optical fiber amplifiers for WDM optical networks". En: *Bell Labs Technical Journal* 4.1 (1999), págs. 187-206. doi: [10.1002/bltj.2153](https://doi.org/10.1002/bltj.2153).
- [22] Man Tan et al. "Real-time Unrepeated C+L Band Transmission of 36 Tb/s Capacity over 342.5 km". En: *2023 21st International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. 2023, págs. 1-3. doi: [10.1109/ICOON59242.2023.10236400](https://doi.org/10.1109/ICOON59242.2023.10236400).
- [23] Emanuele Virgillito et al. "Network Performance Assessment with Uniform and Non-Uniform Nodes Distribution in C+L Upgrades vs. Fiber Doubling SDM Solutions". En: *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. 2020, págs. 1-6. doi: [10.23919/ONDM48393.2020.9133013](https://doi.org/10.23919/ONDM48393.2020.9133013).
- [24] Helio Waldman. "The Impending Optical Network Capacity Crunch". En: *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. 2018, págs. 1-4. doi: [10.1109/SBFoton-IOPC.2018.8610949](https://doi.org/10.1109/SBFoton-IOPC.2018.8610949).
- [25] Tianhua Xu et al. "Achievable Information Rates in C-band Nonlinear Coherent Optical Communication Systems". En: *2022 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM)*. 2022, págs. 1-2. doi: [10.1109/SUM53465.2022.9858264](https://doi.org/10.1109/SUM53465.2022.9858264).
- [26] Masato Yoshida et al. "1024 QAM, 7-core fiber/multi-core EDFA transmission over 100 km with an aggregated spectral efficiency of 109 bit/s/Hz". En: *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*. 2016, págs. 1-3.
- [27] Chengliang Zhang et al. "Optical Layer Impairments and Their Mitigation in C+L+S+E+O Multi-Band Optical Networks With G.652 and Loss-Minimized G.654 Fibers". En: *Journal of Lightwave Technology* 40.11 (2022), págs. 3415-3424. doi: [10.1109/JLT.2022.3166652](https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3166652).
- [28] Wenchao Zhang et al. "Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment Considering Nonlinear Interference in C+L+S-bands EONs". En: *2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*. 2022, págs. 1-3. doi: [10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850086](https://doi.org/10.23919/OECC/PSC53152.2022.9850086).
- [29] Xu Zhang et al. "3.61 Pbit/s S, C, and L-Band Transmission With 19-Core Single-Mode Fiber". En: *IEEE Photonics Technology Letters* 35.15 (2023), págs. 830-833. doi: [10.1109/LPT.2023.3274310](https://doi.org/10.1109/LPT.2023.3274310).