



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS EN MULTIBANDA

POR

Yerko Mario Antonio Christiansen Álvarez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones.

Profesor Guía
Gabriel Saavedra Mondaca

Enero 2023
Concepción (Chile)

© 2023, Yerko Mario Antonio Christiansen Álvarez

© 2023, Yerko Mario Antonio Christiansen Álvarez

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

“Con mucho amor para Alfonso André Alvial Álvarez”

Agradecimientos

A mi hermana Girlenne, por su empatía y consejos brindados, por el amor incondicional, por su compañía y sabiduría, fuente de inspiración y guía para mi vida. A mis padres Ricardo y Evelyn, por su infinita comprensión, por educarme y brindarme las herramientas necesarias para ser un profesional. A ustedes, mi familia, gracias por estar.

Gracias, a mi profesor guía, Gabriel Saavedra, por su constante compromiso, motivación y por darme la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Optoelectrónica. Gracias a el profesor Jorge Pezoa (QEPD), por su dedicación y por transmitir la pasión por el área de las telecomunicaciones. Académicos y administrativos de la carrera, gracias por poner a disposición su tiempo, conocimientos y experiencias para mi formación como Ingeniero Civil en Telecomunicaciones. Agradecido de las importantes amistades que formé en la universidad, por las grandes experiencias juntos, por las alegrías, por las tristezas y sobre todo por el apañe para poder finalizar esta etapa con éxito.

Gracias a todas las personas que han sido parte de mi etapa universitaria, por esas agotadoras tardes en la central, por esas tardes de fútbol del campeonato DIE, por esos ensayos de baile en el taller de salsa, por esos días eternos en el laboratorio que se acompañaban con un rico café, por las victorias y las derrotas, las buenas energías, las risas y en especial por el amor propagado. ¡Muchas gracias!

Sumario

Actualmente, la fibra óptica es uno de los mejores medios de transmisión de datos, sin embargo, la capacidad de las redes ópticas no es infinita, además, la demanda de ancho de banda aumenta año tras año. Debido a lo anterior, es necesario simular las redes ópticas elásticas (EON), que se posicionan como una de las mejores soluciones frente al colapso de las redes ópticas actuales. En ésta Memoria de Título, se plantean diferentes escenarios de simulación, con la finalidad de estudiar el comportamiento de las EON, específicamente para transmisiones en la banda C y multibanda L, C y S. La asignación de recursos de redes ópticas es uno de los grandes desafíos, elecciones como asignación de ruta, formato de modulación y espacio en el espectro, son importantes para una administración eficiente de éstos recursos.

Por otro lado, se implementa *Geometric Constellation Shaping*, que es parte de investigaciones recientes, cuya finalidad, mediante la modificación de la posición de los puntos de las constelaciones de cada formato de modulación, es obtener ganancias de alcance en transmisiones por fibra óptica. Además, como se quiere mejorar la efectividad de la red, las simulaciones realizadas se llevan a cabo considerando un esquema de detección y corrección de errores, *Forward Error Correction* (FEC), utilizando un FEC de 7% y un FEC de 20%. También, es considerado un trabajo previo, que permite relacionar valores de SNR, que fueron obtenidos en base al modelo de ruido gaussiano de fibra óptica, con un respectivo *spans*, lo que asocia el SNR de cada formato de modulación su respectivo *reach* o alcance de transmisión.

Se simula para tres grandes grupos: formatos de modulación clásicos FEC 7%, formatos de modulación clásicos FEC 20% y formatos de modulación optimizados FEC 20%, para dos escenarios que se diferencian por la topología de red utilizada (NSFNet y Eurocore). Los resultados y la eficiencia de la red se analiza en base a carga de tráfico y probabilidad de bloqueo, tanto para la banda C, como multibanda. Finalmente, se deja en evidencia la mejora de calidad de la red, para algunos escenarios, gracias a la administración eficiente de recursos ópticos y a la optimización de formatos de modulación. Sin embargo, como es parte de investigaciones recientes, se plantea seguir estudiando la simulación de redes ópticas elásticas multibanda en diferentes escenarios.

Summary

Currently, fiber optics is considered the best data transmission medium, however, the capacity of optical networks is not infinite. On the other hand, in telecommunications, the demand for bandwidth increases over the years. Due to the above, it is necessary to simulate elastic optical networks (EON), one of the best solutions against the collapse of current optical networks. In this research, different simulation scenarios are proposed, in order to study the behavior of EONs, specifically for transmissions in C band and multiband L, C and S. The allocation of optical network resources is one of the great challenges Choices such as routing, modulation format, and spectrum space are important for efficient administration.

Also, Geometric Constellation Shaping is implemented, whose purpose, by modifying the position of the constellation points of each modulation format, is to increase the range in fiber optic transmissions. As we want to improve the effectiveness of the network, the simulations carried out are carried out considering an error detection and correction scheme, Forward Error Correction (FEC), using an FEC of 7% and an FEC of 20%. Also, a previous work is considered, which allows relating SNR values, which were obtained based on the Gaussian fiber optic noise model, with a respective spans, which associates the SNR of each modulation format with its respective transmission range.

It is simulated for three large groups: classic FEC 7% modulation formats, classic FEC 20% modulation formats, and optimized FEC 20% modulation formats, for two scenarios using different network topologies (NSFNet and Eurocore). The results and the efficiency of the network are analyzed based on traffic load and probability of blocking, both for C-band and multi-band. Finally, the improvement in network quality is evident, for some scenarios, thanks to the efficient management of optical resources and the optimization of modulation formats. However, as it is part of recent research, it is proposed to continue studying the simulation of multiband elastic optical networks in different scenarios.

Índice

Agradecimientos	III
Sumario	IV
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Definición del problema	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcances y limitaciones	5
1.5. Metodología	5
2. Teoría	6
2.1. Reseña histórica	6
2.2. Redes ópticas WDM	9
2.3. Redes ópticas elásticas EON	12
2.4. Migración a redes ópticas elásticas multibanda	12
2.4.1. Asignación de recursos	13
2.5. Carga de tráfico	20
2.6. Probabilidad de bloqueo	21
2.7. FEC: Forward Error Correction	21
2.8. Eficiencia espectral	22
3. Simulador	23
3.1. Parámetros de entrada	24
3.1.1. Demanda	24
3.1.2. Topología de red y rutas.	24

3.1.3.	Formatos de modulación para banda C	25
3.1.4.	Formatos de modulación para banda L+C+S	30
4.	Resultados experimentales	32
4.1.	Simulación Banda C	32
4.1.1.	Escenario 1: NFSNET	33
4.1.2.	Escenario 2: EUROCORE	37
4.2.	Eficiencia espectral	39
4.3.	Simulación Bandas S, C y L	41
4.3.1.	Escenario 1: NSFNet	42
4.3.2.	Escenario 2: EUROCORE	44
5.	Conclusiones	46
5.1.	Conclusiones	46
5.2.	Trabajo futuro	47
	Glosario	48
	Referencias	49
	Anexos	53
6.3.	Obtención de reach para simulación en banda C	53
6.4.	Obtención de reach para simulación en multibanda L, C y S	54
6.5.	Conexiones rechazadas en la banda C	59

Índice de tablas

2.1. Bandas de transmisión para fibra óptica (Fuente: PRORED [21]).	15
3.1. FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.	26
3.2. FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación clásicos con FEC de 20%.	26
3.3. FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación optimizados con FEC de 20%.	26
3.4. SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.	28
3.5. SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 20%.	28
3.6. SNR y Reach para formatos de modulación optimizados con FEC 20%.	28
3.7. Tabla comparativa de Reach para cada grupo de formato de modulación.	29
3.8. Porcentaje de ganancia FM clásicos con FEC 20% con respecto a FEC 7%	29
3.9. Porcentaje de ganancia FM optimizados con FEC 20% con respecto a FM clásicos con FEC 7%	29
3.10. SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.	30
3.11. SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 20%.	31
3.12. SNR y Reach para formatos de modulación optimizados con FEC 20%.	31
4.1. Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 1.	34
4.2. Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 2.	37
4.3. Resumen eficiencia espectral medido en [b/s/Hz].	40
4.4. Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 1 multibanda.	43
4.5. Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 2 multibanda.	44

Índice de figuras

1.1. Evolución de conexiones Internet fija desde 2011 a 2022 en Chile (Fuente: SubTel).	2
1.2. Evolución de tráfico de datos Internet fija desde 2019 a 2022 (Fuente: SubTel).	3
2.1. Cables submarinos de conectividad mundial (Fuente: TeleGeography).	6
2.2. Ruta del cable del Pacífico, Cable Mistral (Fuente: Telxius).	7
2.3. Pronóstico de colapso de redes ópticas <i>Capacity Crunch</i> .	8
2.4. Esquema funcionamiento WDM en una fibra óptica (Fuente: Comunidad Huawei [20]).	10
2.5. Esquema de asignación de espectro fijo (Fuente: Revista chilena de Ingeniería).	10
2.6. Soluciones al <i>Capacity Crunch</i> (Fuente: [33]).	11
2.7. Esquema de asignación espectro flexible (Fuente: Revista chilena de Ingeniería [23]).	12
2.8. Grafo aleatorio de 12 nodos. (Fuente: Autor).	13
2.9. Ruta mas corta desde el nodo A hacia K. (Fuente: Autor).	14
2.10. Pérdida en potencia para fibra óptica por cada banda de transmisión (Fuente: PRORED [21]).	15
2.11. Banda S, C y L con sus pérdidas en la fibra (Fuente: Optical Network Design and Planning).	16
2.12. Constelaciones de formatos de modulación clásicos (Fuente: [36]).	17
2.13. Constelaciones de formatos de modulación clásicos (Fuente: [36]).	18
2.14. Constelaciones de formatos de modulación optimizados (Fuente: [36]).	19
2.15. Constelaciones de formatos de modulación optimizados (Fuente: [36]).	20
2.16. Esquema de mensaje con código de detección y corrección de errores. (Fuente [26]).	21
3.1. Topología de red NSFNet.	25
3.2. Topología de red Eurocore.	25
3.3. Spans vs SNR en la banda C.	27
3.4. Spans vs SNR multibanda L, C y S.	30
4.1. Diagrama de funcionamiento simulación en banda C.	33
4.2. Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico para escenario 1.	35
4.3. Utilización de formatos de modulación escenario 1 (450 Erlang).	36

4.4. Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico para escenario 2.	38
4.5. Utilización de formatos de modulación escenario 2 (700 Erlang).	39
4.6. Diagrama de funcionamiento simulación multibanda L, C y S.	42
4.7. Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico.	43
4.8. Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico.	45
6.1. Banda C para FM clásicos FEC 20 %	53
6.2. Banda C para FM optimizados FEC 20 %	53
6.3. Banda C para FM clásicos FEC 7 %	54
6.4. Banda L para FM clásicos FEC 20 %	54
6.5. Banda C para FM clásicos FEC 20 %	55
6.6. Banda S para FM clásicos FEC 20 %	55
6.8. Banda C para FM optimizados FEC 20 %	56
6.7. Banda L para FM optimizados FEC 20 %	56
6.9. Banda S para FM optimizados FEC 20 %	57
6.10. Banda L para FM clásicos FEC 7 %	57
6.11. Banda C para FM clásicos FEC 7 %	58
6.12. Banda S para FM clásicos FEC 7 %	58
6.13. Solicitudes de conexión rechazadas para escenario 1.	59
6.14. Solicitudes de conexiones rechazadas para escenario 2.	59

1. Introducción

1.1. Motivación

El gran avance de la tecnología de la información y comunicación ha permitido a la fibra óptica posicionarse como uno de los mejores medios de transmisión de datos siendo uno de los más utilizados. En las telecomunicaciones, se sabe que la demanda del tráfico de datos se duplica cada dos o tres años aproximadamente y, actualmente, se requiere y se exige un servicio de Internet rápido, de calidad y eficiente, dado que, nuevas aplicaciones como *Big Data*, AI, IoT, *streaming* requieren un amplio ancho de banda, por lo mismo, se espera que a medida que pasan los años, siga en aumento la demanda de tráfico de datos en las redes ópticas [2].

En los últimos años la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) ha sido la encargada de compensar las demandas de ancho de banda en las comunicaciones ópticas, cuyo formato de transmisión, se basa en utilizar diferentes longitudes de onda para la transmisión de datos por un mismo filamento [4]. La comunicación a través de la fibra óptica se lleva a cabo en la banda C del espectro electromagnético, comprendiendo longitudes de onda entre 1530 nm y 1565 nm, favoreciendo las bajas pérdidas que posee dicha banda con respecto a las otras, siendo empleada en redes metropolitanas, largas distancias y submarinas, por lo que, debido al aumento continuo en la demanda de tráfico en ésta banda, se visualiza, un potencial colapso de las capacidades de las redes ópticas en los próximos años, suceso conocido como *Capacity Crunch*[3].

En Chile, la alta demanda de tráfico de datos en el país, motivó a un crecimiento explosivo de la infraestructura de fibra óptica durante 2018 a 2022, posicionando este medio de transmisión de datos como la principal tecnología de Internet fija, superando a las tecnologías ADSL y HFC, alcanzando un 58,3% del total de conexiones a marzo de 2022, ilustrado en la Figura 1.1. La transmisión de datos a través de la fibra óptica se realiza por medio de pulsos de luz, ofreciendo grandes ventajas que destacan a la fibra óptica frente a otras tecnologías, por ejemplo, posee un ancho de banda más amplio, las interferencias electromagnéticas no afectan la señal óptica transmitida y posee bajas pérdidas de potencia por lo que brinda mayor alcance.

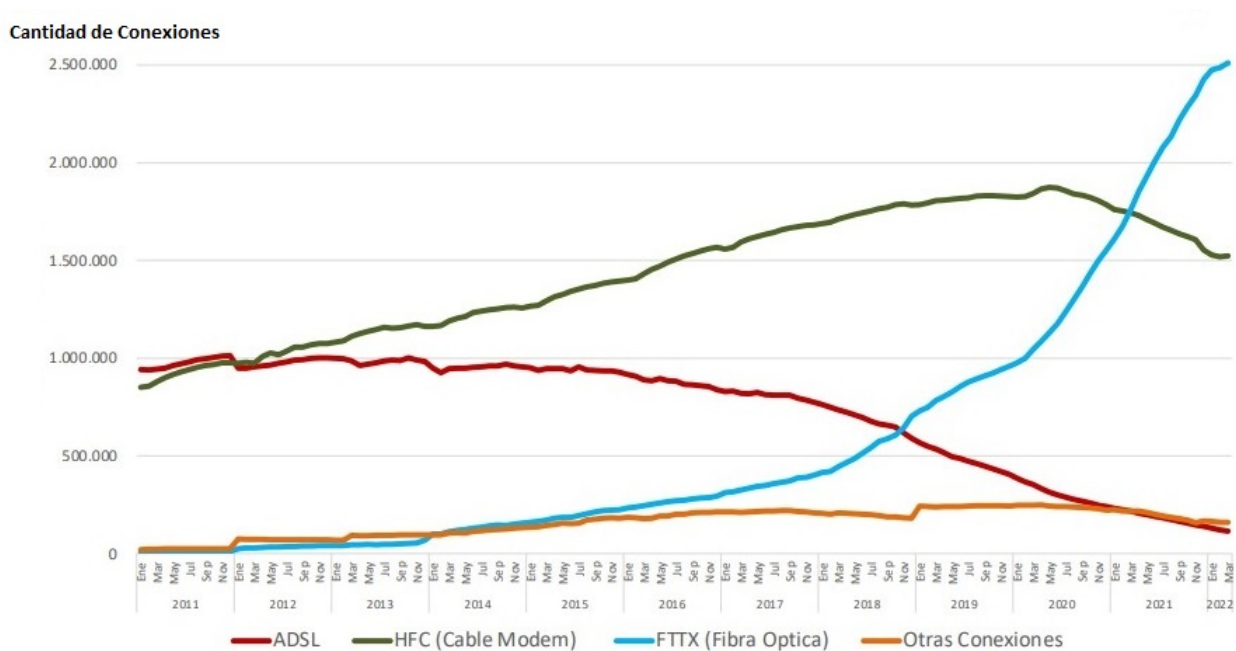


Figura 1.1: Evolución de conexiones Internet fija desde 2011 a 2022 en Chile (Fuente: SubTel).

Por otro lado, la sociedad se vió altamente afectada por la pandemia COVID-19. El confinamiento, aislación y distanciamiento fueron las principales armas para evitar la propagación del virus, consecuencia de ésto, el teletrabajo, clases *online*, plataformas de *streaming*, entre otras aplicaciones, fueron más frecuentes de lo habitual, generando una creciente demanda de ancho de banda, ocasionando un fenómeno mundial de aumento de tráfico de datos. En muchas regiones del mundo, el tráfico de datos durante el periodo de pandemia sufrió un drástico aumento, en particular, para Chile (Figura 1.2) desde el inicio del confinamiento en marzo de 2020 hasta marzo de 2022, existe un aumento aproximado de 1.000.000 TB, reafirmando el efecto de la pandemia y las proyecciones en el aumento de tráfico por cada año. Es importante estudiar alternativas para anticiparse al *Capacity Crunch*, que está pronosticado para esta década. Eventos inesperados como la pandemia, afectan al tráfico de datos, por lo que trabajar en el mejoramiento de capacidades de las redes ópticas se vuelve fundamental para enfrentar la demanda de tráfico y los requerimientos actuales de los usuarios.

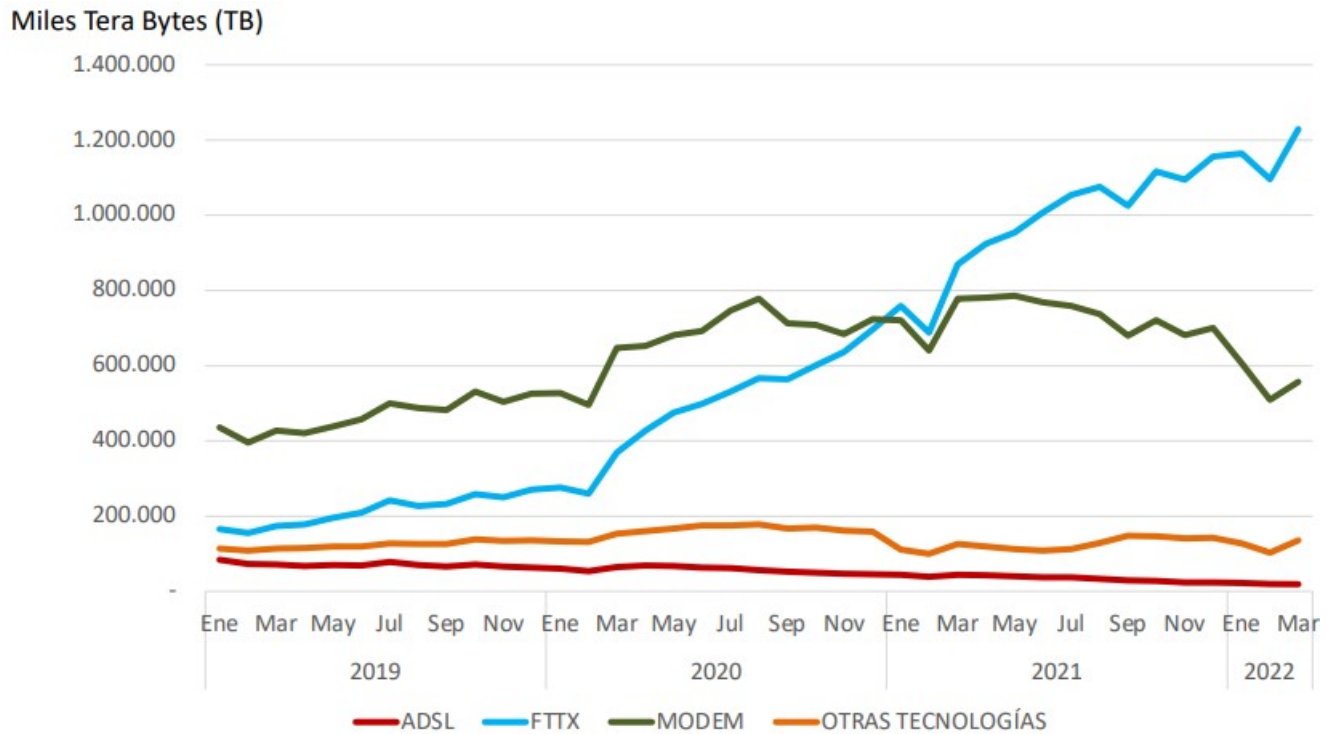


Figura 1.2: Evolución de tráfico de datos Internet fija desde 2019 a 2022 (Fuente: SubTel).

Las redes ópticas elásticas (EONs) nacen como una posible solución frente al *Capacity Crunch*, ya que, plantea el uso eficiente de recursos, como la asignación del espectro, formatos de modulación y rutas, obteniendo grandes ventajas frente a las redes ópticas WDM, por ejemplo, poseen la capacidad de administrar de forma flexible el espectro de acuerdo al ancho de banda requerido por cada conexión, en tanto, para las redes actuales, cada conexión utiliza la misma cantidad de espectro prefijado, generando un desperdicio de éste [37]. Además, debido a la saturación de la banda C del espectro, se plantea la transmisión de datos en multibanda, es decir, ampliar las bandas de transmisión y no limitarse sólo a la banda C, si no que incluir las bandas vecinas que poseen bajas pérdidas en la transmisión por fibra óptica, de esta forma, se logra ampliar el espectro disponible para nuevas conexiones [25]. La transmisión multibanda se dará en la combinación de las bandas L, C y S.

1.2. Definición del problema

La banda C de transmisión de datos por fibra óptica se ve posiblemente saturada por la alta demanda de ancho de banda. Esta demanda, aumenta año tras año con las actualizaciones y nuevas aplicaciones de la Internet y, también, debido a las consecuencias de la pandemia. Por lo anterior, nace la necesidad de migrar a las redes ópticas elásticas con transmisión multibanda, compensando el requerimiento de ancho de banda y administrando de manera eficiente los recursos en una red óptica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estudiar los beneficios de la transmisión en redes ópticas elásticas considerando diferentes formatos de modulación, configuraciones de ancho de banda y topologías de red, específicamente para la transmisión en la banda C y multibanda L,C y S.

1.3.2. Objetivos específicos

- Habilitar simulador de redes ópticas elásticas.
- Implementar algoritmos de asignación de recursos de redes ópticas elásticas en diferentes escenarios de simulación.
- Estudiar reach para formatos de modulación clásicos y optimizados, tanto en la banda C como multibanda.
- Simular red óptica elástica en banda C para formatos de modulación clásicos y optimizados.
- Simular red óptica elástica multibanda para formatos de modulación clásicos y optimizados.
- Generación y análisis de gráficos con resultados de simulación, considerando carga de tráfico y probabilidad de bloqueo.

1.4. Alcances y limitaciones

Se establece el estudio de parámetros con la finalidad de analizar, documentar y concluir acerca de los diferentes escenarios creados en la simulación de red óptica elástica con transmisión multibanda. El desarrollo de la Memoria de Título contempla simulaciones para bandas activas en función de carga de tráfico considerando la probabilidad de bloqueo, rutas y formatos de modulación.

1.5. Metodología

El desarrollo de esta investigación se realiza en base a un simulador de redes ópticas elásticas escrito en lenguaje C++, lo que permite mayor flexibilidad para crear nuevos algoritmos de asignación de recursos, modificar variables y parámetros, considerando diferentes escenarios en la banda C, como la combinación de bandas L, C y S. Además, se consideran diferentes topologías de red, NFSNet y Eurocore.

2. Teoría

2.1. Reseña histórica

A principios de la década de los 80, la industria de las telecomunicaciones comenzó a migrar gran parte de su capa física de redes interurbanas a cable de fibra óptica, marcando un hito como el comienzo del gran crecimiento que tendría este medio de transmisión de datos. En la misma década, se popularizaron los cables submarinos de fibra óptica, que en la actualidad, permiten el tráfico de datos a nivel mundial, manteniendo conexiones intercontinentales mostradas en la Figura 2.1. Hoy en día, la fibra óptica es considerada la mejor tecnología para transportar datos, por esto, las redes de fibra óptica, transmiten más del 95% del tráfico de datos en el mundo. Sin embargo, se sabe que la vida útil y la capacidad de éstas redes no son infinitas, por ello, es necesaria la mantención y actualización de nuevas rutas de cables trasoceánicos por el mundo. [7, 8]

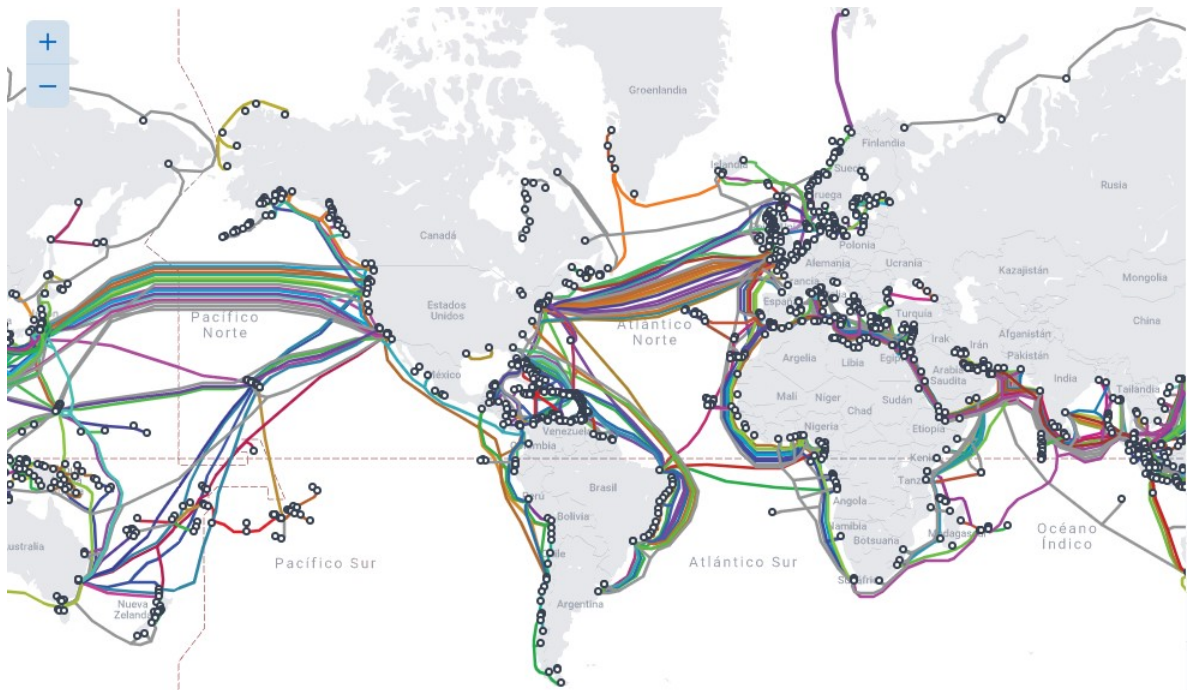


Figura 2.1: Cables submarinos de conectividad mundial (Fuente: TeleGeography).

En Chile, el acceso a Internet, se hace principalmente por tres cables submarinos, SAC, PAM-A y SAM-1. A mediados del año 2021, se incorpora un nuevo cable submarino SPSC, mas conocido por su nombre comercial “Cable Mistral”, construido en por Claro (América Móvil) y Telxius. El proyecto Mistral consta de un cable submarino de 7.300 km que conecta Puerto

San José (Guatemala) a Valparaíso (Chile), teniendo tres puntos de aterrizaje adicionales por el Pacífico de América Latina, en Salinas (Ecuador), Lurín (Perú) y Arica (Chile), ilustrado en la Figura 2.2. SPSC se transforma en un proyecto fundamental para la conectividad en Chile, permitiendo el transporte de alrededor del 99% de datos provenientes de Arica hacia diversos puntos del país [15]. Para lograr conectividad en las ciudades del país, los cables submarinos dan paso a las troncales de fibra óptica que por lo general, se instalan en conductos soterrado o vía aérea. El cable troncal corresponde a el cable de fibra óptica alimentador, con una cantidad de núcleos que pueden varias desde docenas hasta cientos, incluso miles de núcleos.



Figura 2.2: Ruta del cable del Pacífico, Cable Mistral (Fuente: Telxius).

A fines de 2021, el Gobierno de Chile y la empresa GTD inaugura el cable submarino “Prat”, proyecto que otorga conectividad desde Arica hasta Puerto Montt, cubriendo requerimientos de capacidad de datos y calidad de Internet en Chile. El proyecto Prat otorga mayores oportunidades de desarrollo y crecimiento a doce ciudades de Chile (Arica, Iquique, Tocopilla, Antofagasta, Caldera, La Serena, Concón, Cartagena, Constitución, Concepción, Puerto Saavedra y Puerto Montt). Hasta aquí, se contabiliza mas de 18 mil kilómetros de fibra óptica extendidos por todo Chile. Si se trata de conectar Chile con el mundo, uno de los grandes proyectos en Chile es el Cable Humboldt, el cual considera una distancia aproximada de 13 mil kilómetros, entre las ciudades de Valparaíso y Auckland. Por otro lado, entre Nueva Zelanda y Asia, se conectara mediante cables ya instalados buscando mejorar la conectividad de Chile y Asia. A éste ultimo proyecto, Argentina y Brasil han demostrado interés de participar [14].

Aún existe una gran brecha digital, por lo que, con el objetivo de desarrollar una carretera

digital para Chile y Sudamérica, actualmente se trabaja en el proyecto de Fibra Óptica Nacional (FON), Fibra Óptica Austral (FOA), Fibra Óptica Tarapacá (FOT). Estos proyectos son importantes para combatir el crecimiento exponencial del tráfico de datos y el uso excesivo de las redes de telecomunicaciones. FON entregará conectividad mediante el despliegue de 10.000 kilómetros de fibra óptica desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos, FOA contempla el despliegue de aproximadamente 4.500 kilómetros de tendido de fibra óptica desde Puerto Montt hasta Puerto Williams, pasando por Caleta Tortel y Punta Arenas, FOT conectará la Región de Tarapacá mediante la extensión de mas de 800 kilómetros de fibra óptica. En el año 2016, las Naciones Unidas declaró el acceso a Internet como un derecho humano, tal cual como el agua potable o alimentación. A pesar de todos los proyectos que mejoran la conectividad de los usuarios, en el mundo y en Chile aún existe desigualdad en el acceso a Internet y a las tecnologías de información. Disminuyendo la brecha digital, otros ámbitos se verán beneficiados como la comunicación, salud, educación, entre otros.

Es necesario destacar, que a medida que aumentan las conexiones de fibra óptica, también lo hace la demanda de tráfico de datos, es así como entre los años 2020 y 2030, se pronóstica un colapso de redes ópticas o también llamado *Capacity Crunch* (Figura 2.3), sin considerar el aumento radical de la demanda de ancho de banda durante el período de pandemia, ya se visualizaba un colapso.

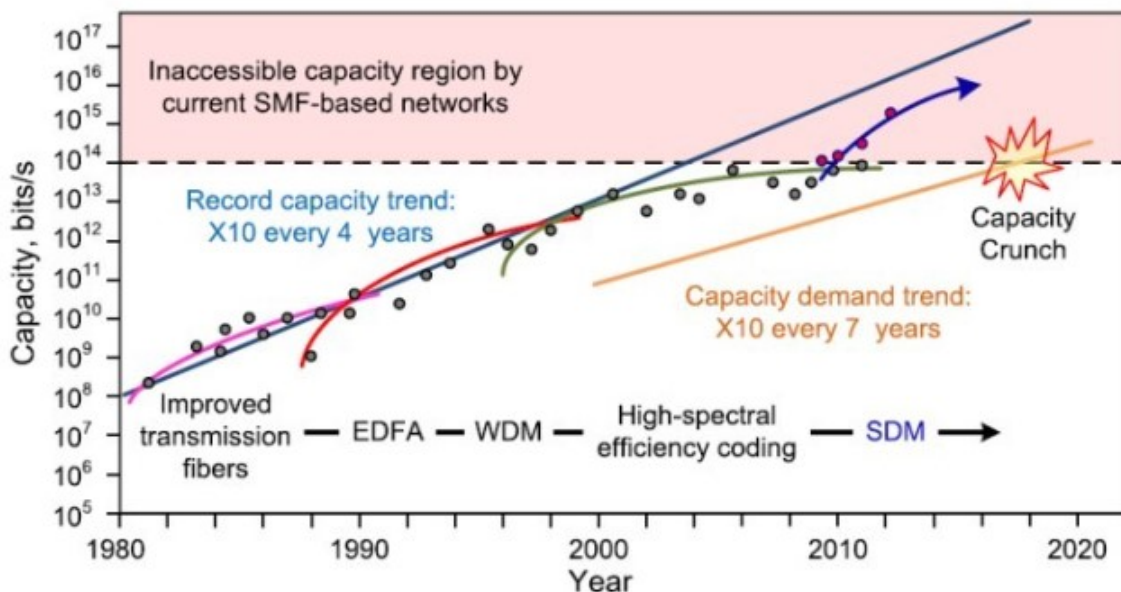


Figura 2.3: Pronóstico de colapso de redes ópticas *Capacity Crunch*.

La cantidad de conexiones y tráfico de datos en redes de telecomunicaciones va en aumento, debido a esto, en los últimos años se ha visto un gran crecimiento en cuanto infraestructura de las telecomunicaciones en Chile y en el mundo, pero, siguen aumentando los requerimientos. Por lo anterior, es necesaria la indagación en esta área para buscar soluciones alternativas para la demanda actual y futura de ancho de banda. El grupo IRO (Investigación en Redes Ópticas) conformado por investigadores de la Universidad de Concepción (UdeC), la Universidad Adolfo Ibañez (UAI), la Universidad Técnica Federico Santa María, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y University College London (UCL), actualmente es el único grupo de este tipo en Chile, donde colaboran para desarrollar soluciones, optimizar y mejorar la operación de redes ópticas WDM.

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM), ha sido la encargada de satisfacer las necesidades de ancho de banda. Es importante realizar proyecciones en el tiempo, por que situaciones mundiales como la pandemia del COVID-19, avances en telemedicina y nuevas tecnologías, requieren un mayor ancho de banda, por lo que para grandes empresas y gobiernos, es necesario suplir estas demandas y no esperar a que ocurra una saturación de las redes. Por esta razón, es de importancia simular redes ópticas con diferentes escenarios, estudiar el comportamiento de éstas con la finalidad de aumentar la capacidad u optimizar las redes ópticas WDM, además de proyectarse en el tiempo.

2.2. Redes ópticas WDM

El funcionamiento de la tecnología WDM consiste en enviar grandes cantidades de información por una sola fibra mediante una variedad de señales ópticas utilizando diferentes longitudes de onda. En este sistema, la señales ópticas se multiplexan, es decir, se combinan en un extremo y, por otro lado, en el otro extremo de la fibra óptica, se separan o demultiplexan. En la Figura 2.4 se ilustra el funcionamiento de la tecnología WDM, mencionando, los componentes físicos claves para establecer comunicación óptica, como lo son el multiplexador óptico, amplificador óptico y demultiplexor óptico. Se destaca que la tecnología WDM es la más utilizada en la comunicación óptica.

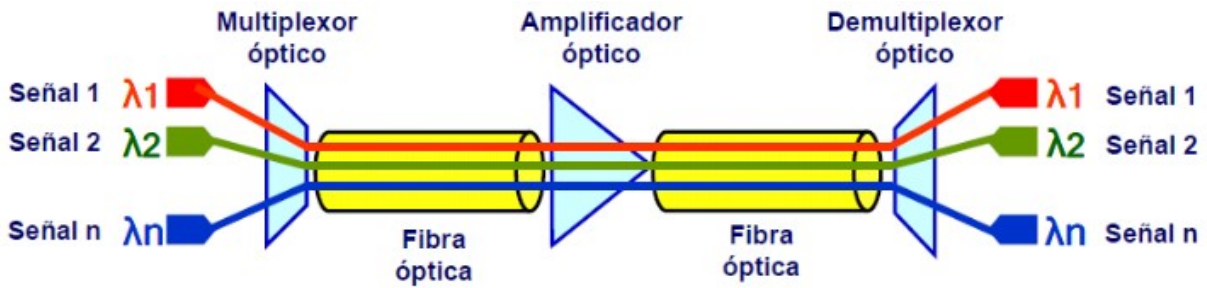


Figura 2.4: Esquema funcionamiento WDM en una fibra óptica (Fuente: Comunidad Huawei [20]).

En la actualidad, la asignación de espectro para las solicitudes de conexión en redes WDM se hace mediante la grilla fija o espectro fijo. Este método consiste en asignar un espacio espectral a cada uno de los canales de la misma fibra óptica, se utiliza por norma de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) una separación del espectro de 50 GHz, por ejemplo, en la Figura 2.5, se tienen cuatro canales ópticos canal 1, 2, 3 y 4 con sus velocidades de transmisión 100 Gbps, 2.5 Gbps, 40 Gbps y 10 Gbps y sus requerimientos de ancho de banda 50 GHz, 10 GHz, 25 GHz y 12.5 GHz, respectivamente. En este caso, si hay una solicitud de conexión donde se asigna un ancho de banda menor a 50 GHz como en los canales 2, 3 y 4, tendrá como consecuencia un mal uso del espectro electromagnético, dejando espacios espectrales no disponibles para otra conexión.

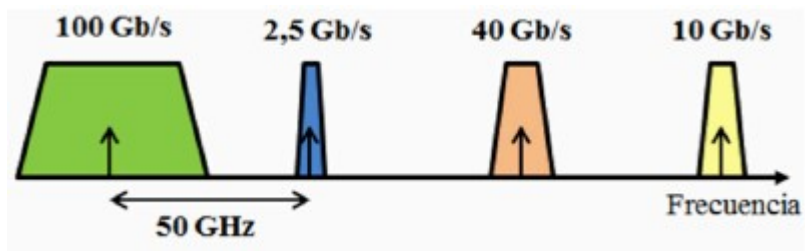


Figura 2.5: Esquema de asignación de espectro fijo (Fuente: Revista chilena de Ingeniería).

Por otro lado, para solucionar el problema de *Capacity Crunch* en las redes ópticas actuales, se tienen dos opciones:

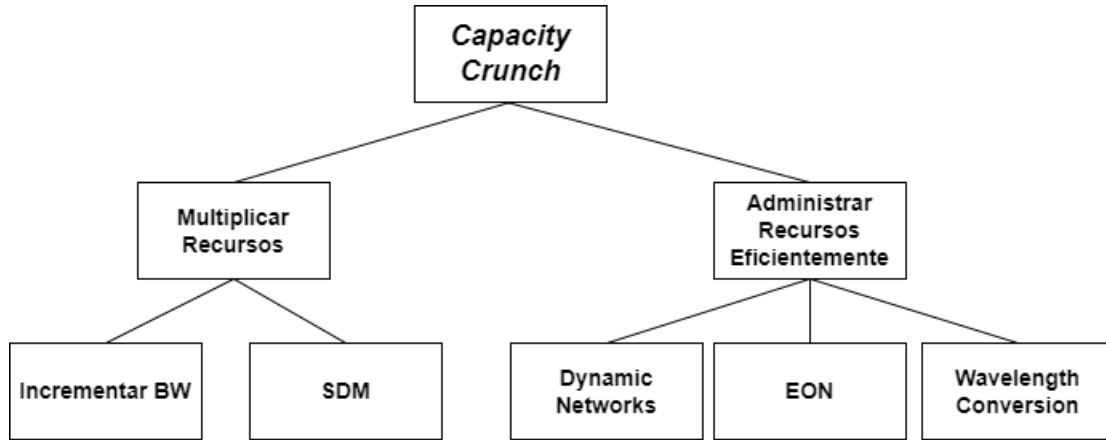


Figura 2.6: Soluciones al *Capacity Crunch* (Fuente: [33]).

1. **Multiplicar recursos:** se resume en soluciones físicas como aumentar la infraestructura de redes ópticas ya existentes instalando fibra nueva o utilizando el método de multiplexación por división espacial, Spatial Division Multiplexing (SDM), lo que conlleva el trabajo de instalación de fibra multinúcleo. Ambas opciones en teoría deberían aumentar el ancho de banda, sin embargo, el trabajo que conlleva es bastante [33].
2. **Administrar recursos eficientemente:** la idea es optimizar las redes ópticas ya existentes. Se tiene como alternativa evitar la fragmentación del espectro con el método de conversión de longitud de onda. Otra opción, es utilizar redes dinámicas, que a diferencia de las redes estáticas, asigna recursos a medida que se va demandando, permitiendo, por ejemplo, elegir una ruta disponible con menos tráfico. Por último, utilizar las redes ópticas elásticas, *Elastic Optical Networks* (EON), que promueve el uso eficiente del espectro dividiendo en slots de frecuencia, *Frequency Slots Unit* (FSU), y asignando de manera eficiente a lo demandado, logrando velocidades superiores [33].

De la misma forma que las redes ópticas evolucionan y las demandas de los usuarios aumentan, nacen nuevas ideas con la finalidad de cubrir el ancho de banda solicitado y maximizar la capacidad de la red. Para cumplir sus objetivos, las EON se basan en el uso y administración eficiente de recursos como la asignación de ruta, espectro y formato de modulación.

2.3. Redes ópticas elásticas EON

Como se sabe, la capacidad de las redes ópticas no es infinita, por lo mismo, para suplir las limitaciones de las redes WDM, se propone trabajar con redes ópticas elásticas que tiene como finalidad la administración y uso eficiente del espectro. El funcionamiento de las EON, o también conocidas como redes ópticas con grilla flexible, tiene como objetivo asignar una ubicación y separación espectral que no está prefija en el espectro. De esta forma, se genera un uso mas eficiente del espectro óptico que, en efecto, permite transmitir un mayor número de canales ópticos. Para lograr un uso eficiente, el espectro óptico es separado en mínimas partes llamadas FSU, que poseen un ancho espectral de 12,5 GHz. En la Figura 2.7, para el canal óptico 1 de 50 GHz se requiere utilizar cuatro FSU, en cambio para el canal 3 que requiere 25 GHz se utilizarán dos FSU, dejando disponible el espectro que no se utiliza para otra conexión. La asignación mediante grilla flexible permite una mayor cantidad de solicitudes de conexión en comparación con la grilla fija [34]. En la Figura 2.7, se muestra la asignación de forma flexible del espectro a los mismo cuatro canales ópticos de la Figura 2.5, ilustrando la ventaja que la grilla flexible presenta frente a la grilla fija, el uso eficiente del espectro mediante la disminución de partes del espectro sin ocupar, dando la posibilidad de que se establezcan una mayor cantidad de canales [28].

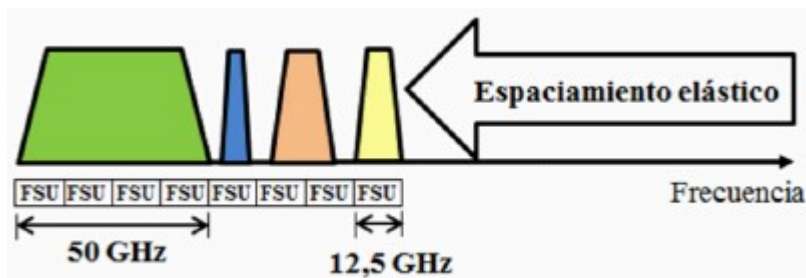


Figura 2.7: Esquema de asignación espectral flexible (Fuente: Revista chilena de Ingeniería [23]).

2.4. Migración a redes ópticas elásticas multibanda

Actualmente, las redes ópticas basadas en la tecnología WDM experimentan limitaciones frente a la gran demanda de tráfico de datos y de velocidad, por lo que se hace necesario migrar a redes ópticas elásticas multibanda. La principal característica de las redes ópticas flexibles, es la ubicación espectral de diferentes canales ópticos, que puede ser asignado sin ninguna parte

del espectro determinada y el ancho de banda se asigna considerando la tasa de transmisión digital en conjunto a la distancia a cubrir [27].

Las EON es la tecnología para la nueva generación en el mundo de las redes ópticas, tienen un variedad de ventajas y características que no pueden brindar las redes ópticas WDM:

- Asignación del espectro flexible
- Conexiones de transporte con velocidad superior a 100 Gb/s.
- Eficiencia espectral.
- Flexibilidad con el tráfico de datos variable en el tiempo.

2.4.1. Asignación de recursos

1. **Rutas:** Consiste en establecer enlaces mediante algoritmos de ruta mas corta o “*shortest path*” entre el nodo de origen hacia el nodo de destino. Los algoritmos mas conocidos es el algoritmo de Dijkstra y Bellman-Ford. El ruteo se puede ejemplificar encontrando la ruta mas corta desde el nodo A hacia el nodo K considerando el grafo aleatorio de la Figura 2.8. Mediante un algoritmo “*shortest simple paths*” se encuentra que la rutas mas cortas son: [A, B, I, K] con 2050 km, [A, C, I,K] con 2930 km y [A, C, B, I, K] con 3040 km, por ende, la mejor opción, establece el camino mas corto comenzando desde el nodo A, pasando por el nodo B, nodo I y finalizando con el nodo K, sumando 2050 kilómetros, representado en la Figura 2.9.

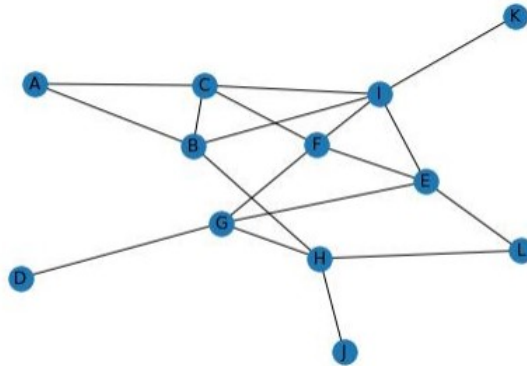


Figura 2.8: Grafo aleatorio de 12 nodos. (Fuente: Autor).

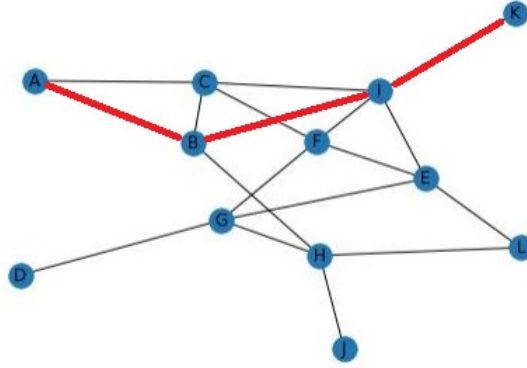


Figura 2.9: Ruta mas corta desde el nodo A hacia K. (Fuente: Autor).

2. **Espectro:** La transmisión de luz a través de la fibra óptica se puede realizar mediante diferentes bandas o ventanas del espectro electromagnético. En mayo de 2002, la organización del UIT-T dividió el espectro de comunicaciones ópticas en seis bandas: O, E, S, C, L y U6. La banda O u banda original corresponde a las longitudes de onda que van desde los 1260 a 1360 nanómetros. La banda E o rango de longitud extendida opera entre los 1360 y 1460 nanómetros. La banda S o banda de onda corta, trabajaba entre los 1460 y 1530 nanómetros, es bastante utilizada en sistemas de red óptica pasiva. La banda C o banda convencional, es la que tiene una mayor ventaja debido a las pocas pérdidas que posee (Figura 2.10), por lo mismo, es la banda mas importante y mas utilizada en muchos sistemas de comunicaciones ópticas a largas distancias, opera entre los 1530 a 1565 nanómetros. La banda L o longitud de onda larga, funciona de los 1565 a 1625 nanómetros, es la segunda banda con la menor cantidad de pérdidas. Finalmente, la banda U o banda de longitud de onda de gran longitud, opera entre 1625 y 1675 nanómetros. Además, se incluye la primera ventana, la banda de 850 nanómetros utilizada principalmente en sistemas de comunicación de fibra óptica multimodo [21]. En la Tabla 2.1 se visualiza un resumen con respecto a las bandas de transmisión, además, en la Figura 2.10 se deja en evidencia la ventaja de la banda C, gracias a sus bajas pérdidas con respecto a otras bandas.

Banda	Descripción	Rango	Ancho de banda
		850 nm (770 - 910 nm)	
O	<i>Original</i>	1260 - 1360 nm	100 nm
E	<i>Extended</i>	1360 - 1460 nm	100 nm
S	<i>Short</i>	1460 - 1530 nm	65 nm
C	<i>Conventional</i>	1530 - 1565 nm	40 nm
L	<i>Long</i>	1565 - 1625 nm	60 nm
U	<i>Ultra-Long</i>	1625 - 1675 nm	50 nm

Tabla 2.1: Bandas de transmisión para fibra óptica (Fuente: PRORED [21]).

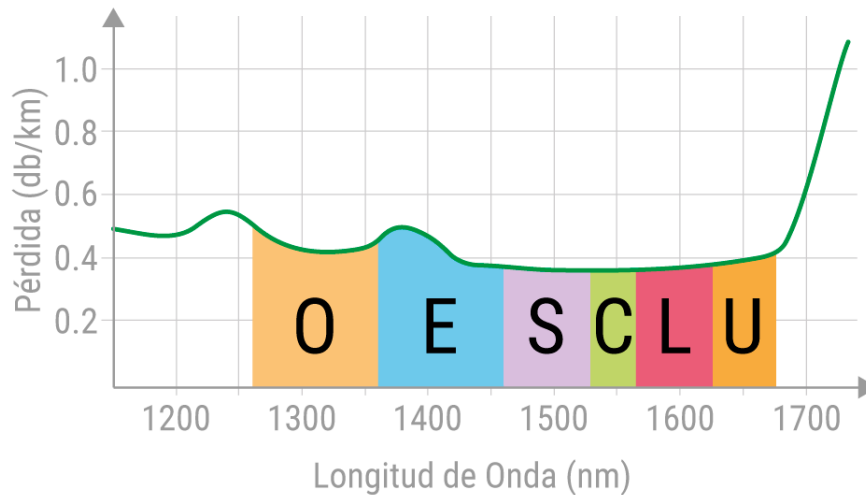


Figura 2.10: Pérdida en potencia para fibra óptica por cada banda de transmisión (Fuente: PRORED [21]).

Durante los últimos años, considerando las bandas de transmisión, el aumento de la capacidad de las redes ópticas establece el estudio de nuevas técnicas de multiplexación de señales ópticas:

- Multiplexación por división espacial (SDM) que tiene como objetivo implementar fibras adicionales en la banda C.
- Multiplexación por división de banda (BDM) que plantea transmitir en todas las bandas de bajas pérdidas, desde la banda U hasta la banda O.

Las bandas en las que se centrará el trabajo son: banda S, C y L. La banda S y L tienen menores pérdidas en comparación con las bandas O, E y U, por lo que, hacer uso de la banda S y L cuando la banda C sea insuficiente para cumplir con el ancho de banda requerido, sería gran opción para aumentar la capacidad de la red [22].

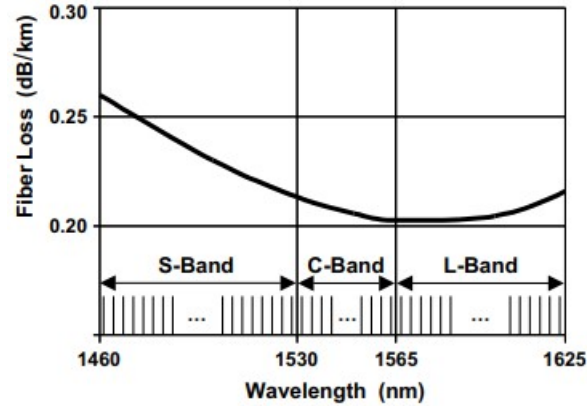


Figura 2.11: Banda S, C y L con sus pérdidas en la fibra (Fuente: Optical Network Design and Planning).

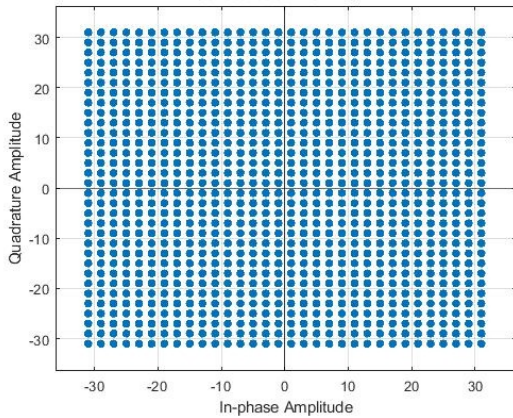
Considerando nuevas bandas de transmisión de datos y el esquema de grilla flexible, se tienen diferentes heurísticas para asignar un espacio en el espectro: Random Fit, Exact Fit, First Fit, entre otras, siendo First Fit la más utilizada.

3. **Formato de modulación:** La asignación de un formato de modulación se puede ejemplificar con un esquema de modulación, en primer caso, compuesto por dos símbolos, donde tendría un gran alcance óptico debido a la difícil interferencia que se podría dar entre sus símbolos. Por otro lado, para un formato de modulación con una mayor cantidad de símbolos, el alcance óptico será menor por la alta probabilidad de que sus símbolos puedan interferir, ya sea por el ruido y/o la atenuación del canal. Entre más símbolos se utilicen en el esquema de modulación, menor ancho de banda se va a requerir, por lo mismo, de acuerdo a las necesidades, se puede seleccionar un formato de modulación priorizando el alcance óptico o ancho de banda.

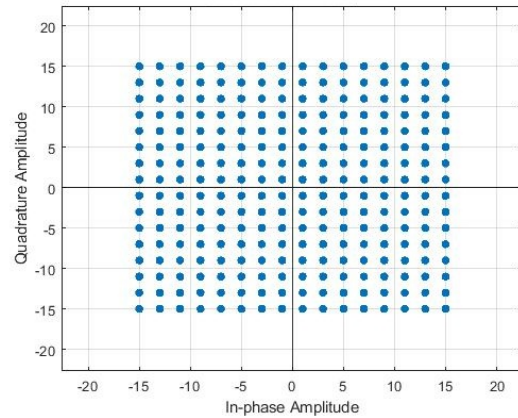
Se han incluido los formatos de modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y cambio de fase (PSK), trabajados en dos dimensiones, las cuales representan los componentes en fase y en cuadratura (I/Q). *Geometric Shaping* es la técnica utilizada para la optimización de formatos de modulación. El método anterior, se basa en la modificación de la distribución de los símbolos de las constelaciones, formando nuevas constelaciones, obteniendo ganancias de 0.2 a 0.5 dB, lo que se traduce en ganancias de alcance para un canal óptico dependiendo la aplicación del mercado [35, 36]. Los formatos de modulación a utilizar se han clasificado en dos grandes grupos, “formatos de modulación clásicos (FM Clásicos)” (Figura 2.12 y

Figura 2.13) y “formatos de modulación optimizados (FM Optimizados)” (Figura 2.14 y Figura 2.15).

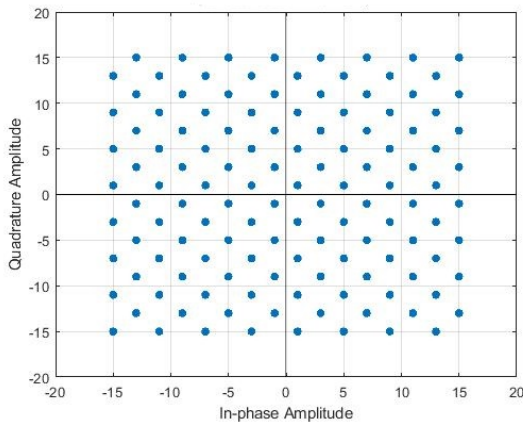
a) Formatos clásicos:



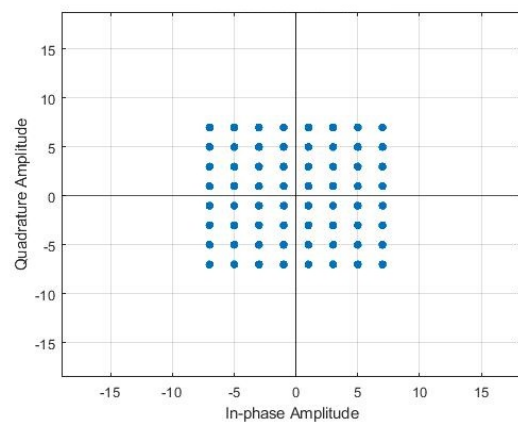
(a) Modulación 1024 QAM



(b) Modulación 256 QAM

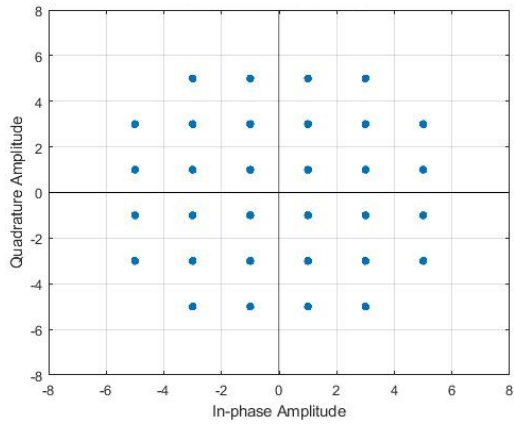


(c) Modulación 128 D2Q2

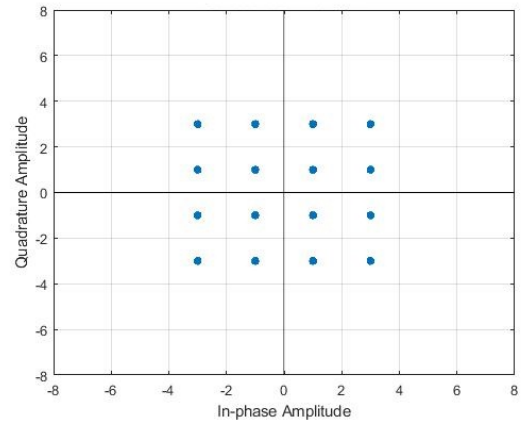


(d) Modulación 64 QAM

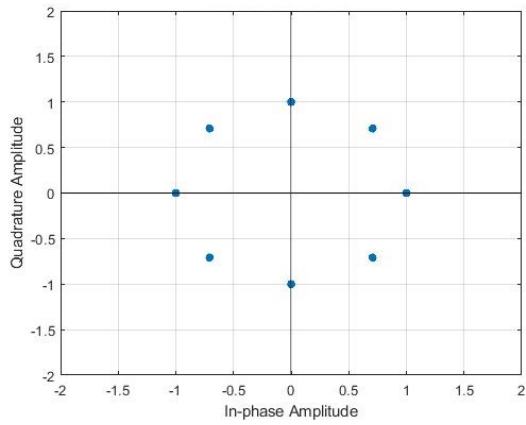
Figura 2.12: Constelaciones de formatos de modulación clásicos (Fuente: [36]).



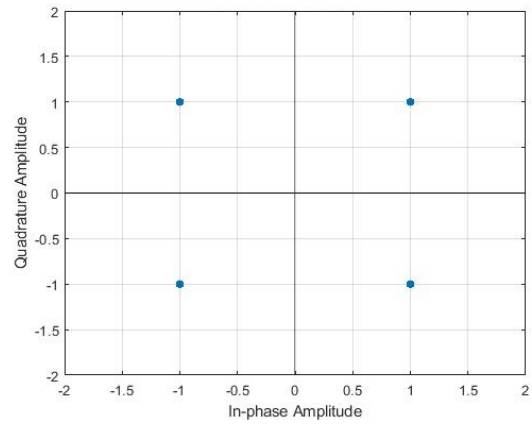
(a) Modulación 32 CROSS2



(b) Modulación 16 QAM



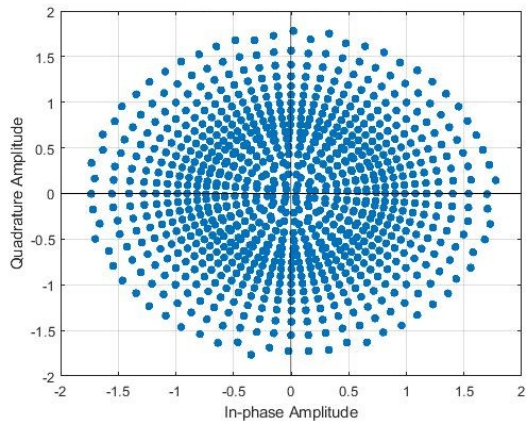
(c) Modulación 8 PSK2



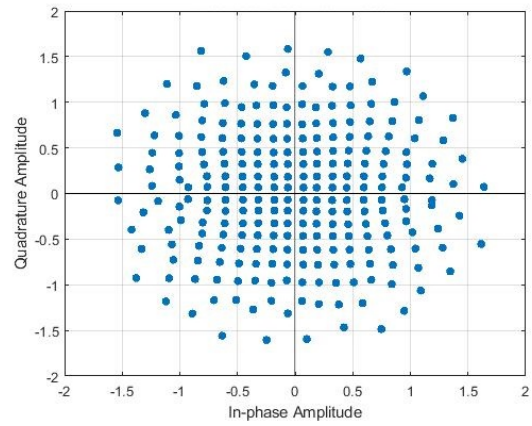
(d) Modulación QPSK

Figura 2.13: Constelaciones de formatos de modulación clásicos (Fuente: [36]).

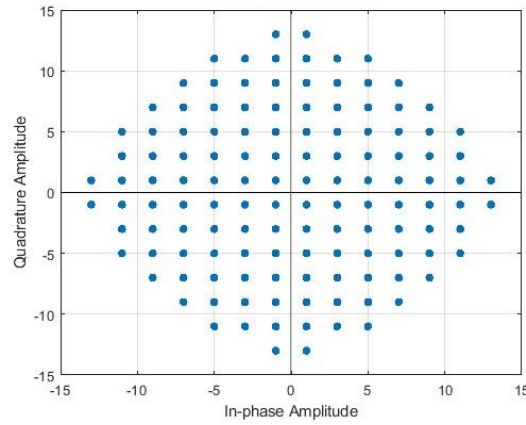
b) Formatos optimizados:



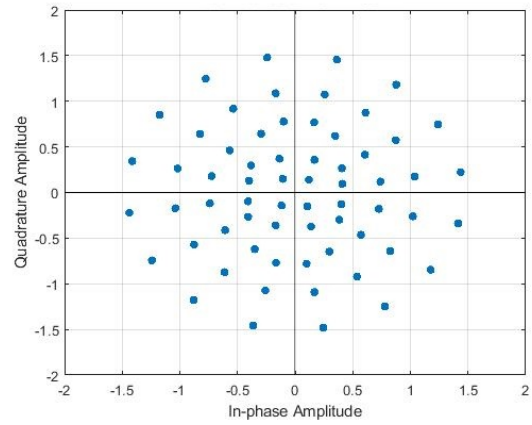
(a) Modulación 1024 2DGS



(b) Modulación 256 2DGS

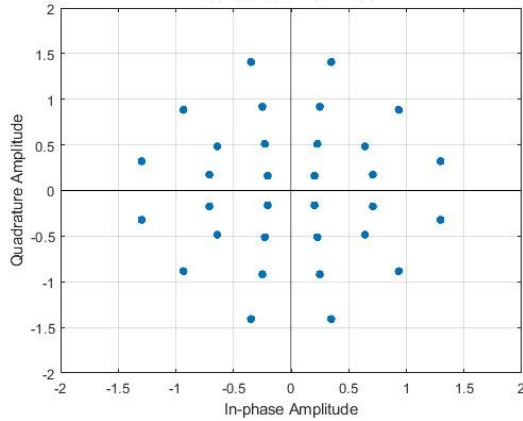


(c) Modulación 128 b2

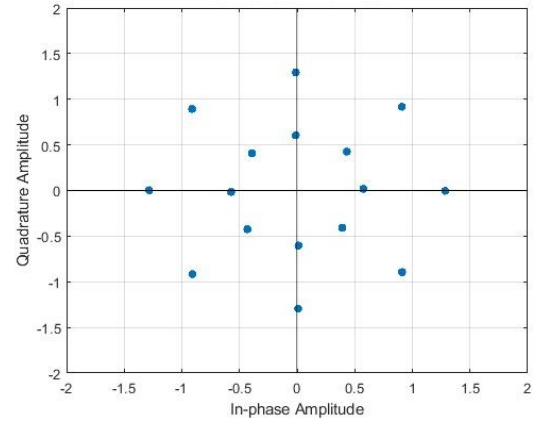


(d) Modulación 64 2DGS

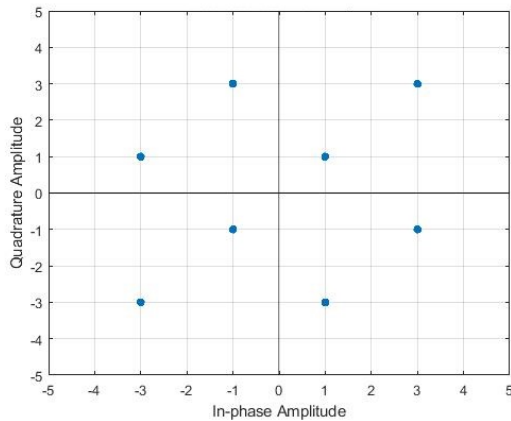
Figura 2.14: Constelaciones de formatos de modulación optimizados (Fuente: [36]).



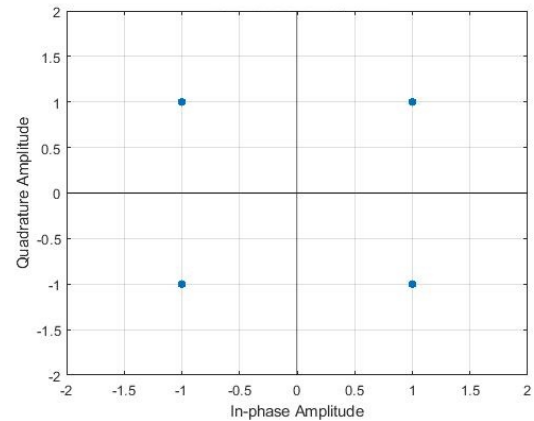
(a) Modulación 32 2DGS



(b) Modulación 16 2DGS



(c) Modulación 8 DSQ2



(d) Modulación QPSK

Figura 2.15: Constelaciones de formatos de modulación optimizados (Fuente: [36]).

Los recursos mencionados anteriormente, se deben asignar con el objetivo de mejorar la capacidad de la red, se busca establecer la mayor cantidad de conexiones posibles en la red y cubrir las demandas de tráfico de datos, problema denominado RMSA, lo que quiere decir “enrutamiento, formato de modulación y asignación de espectro” [31] o si se trabaja en multibanda, se tiene RMBSA, es decir, “enrutamiento, formato de modulación, banda y asignación de espectro”. La opción prometedora es migrar a redes ópticas elásticas multibanda, debido a que se posiciona como una gran solución a la asignación de recursos [32]. Se simulará considerando como métricas principales la carga de tráfico, la probabilidad de bloqueo y FEC.

2.5. Carga de tráfico

La unidad de medida de la carga de tráfico es Erlang que corresponde a una unidad de intensidad de tráfico, usada en enlaces telefónicos, utilización de CPUs, carga de tráfico a nivel

de red, entre otros. El nombre de la unidad de medida es en honor a Agner Krarup Erlang, importante matemático, ingeniero y estadístico danés, pionero en los campos de ingeniería de tráfico de telecomunicaciones y la teoría de colas. Se define como,

$$\text{Traffic Load} = \frac{\text{Mean holding time}}{\text{Mean arrival time}} = \frac{\lambda}{\mu}$$

2.6. Probabilidad de bloqueo

La probabilidad de bloqueo corresponde a una relación de la cantidad de conexiones rechazadas para el total de conexiones. Este parámetro se vuelve importante para el diseño, planificación y optimización de redes ópticas, por lo mismo, la probabilidad de bloqueo es uno de los principales valores que entrega el simulador. Para optimizar la calidad de la red, se sigue la misma idea que la carga de tráfico, mientras más baja la probabilidad de bloqueo, es mayor la capacidad que proporciona. Relaciona la cantidad de conexiones disponibles pero no usados por los usuarios, y la misma cantidad de conexiones cuando todos los usuarios la soliciten siguiendo la idea de mantener las solicitudes rechazadas al mínimo para mejorar la red.

2.7. FEC: Forward Error Correction

FEC es un esquema de codificación que se usa para mejorar el rendimiento de la transmisión de señales, añadiendo bits adicionales a la información logra la detección y corrección de errores sin ninguna retransmisión de información [30]. Es bastante utilizado en los sistemas que utilizan la transmisión de datos digitales de un equipo a otro. En la Figura 2.16, se muestra un código (n, k) , donde $n = k + r$. Se presenta un esquema de composición de un mensaje n transmitida por un canal, el cual está compuesto por k bits de información y r bits redundantes. Los bits redundantes son los que permiten detectar y corregir errores en la información sin necesidad de ser retransmitida [26].

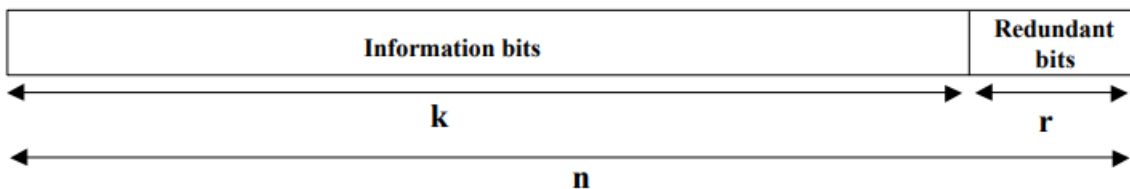


Figura 2.16: Esquema de mensaje con código de detección y corrección de errores. (Fuente [26]).

Se utilizará un FEC de 7%, es decir, 93% corresponde a información del mensaje y también se utilizará un FEC de 20%, donde el 80% del mensaje es información. Con lo anterior se pretende incrementar la efectividad de la red.

2.8. Eficiencia espectral

Se incorpora la eficiencia espectral como métrica para evaluar la calidad de la red, la cual viene dada por

$$\eta_s = \frac{B}{\Delta v_{ch}}$$

donde B es el bit rate del canal y Δv_{ch} es el espacio entre canales en unidades de frecuencia. En la práctica, debido a que la eficiencia espectral es $< 0,6[b/s/Hz]$, se genera un desperdicio de ancho de banda en el canal [29].

3. Simulador

No existe una gran variedad de *software* para simular redes ópticas elásticas. En esta oportunidad, se trabaja con el simulador “*A Flex Next Sim*” basado en el lenguaje C++, diseñado para simular el comportamiento, configurar parámetros y estudiar redes ópticas elásticas. El simulador propone una sencilla forma de crear variables de medición y algoritmos de asignación de recursos, además, gracias al su lenguaje de programación, brinda rapidez en el tiempo de ejecución. Una de las grandes ventajas frente a otros simuladores es la flexibilidad que brinda, permitiendo crear heurísticas propias para la asignación de recursos.[1]

El simulador propone una biblioteca compuesta por 13 clases:

- *Allocator*
- *BitRate*
- *Connection*
- *Controller*
- *Dummy Allocator*
- *Event*
- *Exp Variable*
- *Link*
- *Network*
- *Node*
- *Random Variable*
- *Simulator*
- *Uniform Variable*

Se destaca las clases *Allocator* con la información del asignador, *Simulator*, la cual representa la ejecución de la red, las clases *Link*, *Network*, *Node* permiten manipular, crear y porporcionan información de objetos de enlace, red y nodo respectivamente.

3.1. Parámetros de entrada

Para llevar a cabo las simulaciones, existen tres archivos json fundamentales para construir la clase *Simulator*, ya que, contienen información de la red, ruta y tasa de bits.

3.1.1. Demanda

El simulador genera requerimientos de demanda de usuarios seleccionando de manera aleatoria un valor entre los 10, 40, 100, 200, 400, 800 y 1000 Gbps, asignando los formatos de modulación descritos en la subsección 2.4.1.

3.1.2. Topología de red y rutas.

1. **NSFNet:** Se utiliza la topología de red NSFNet (*National Science Foundation Network*). Ésta red es bastante utilizada para investigaciones y estudios en el área de las telecomunicaciones y para las próximas simulaciones, se incorpora al código principal de *Visual Studio Code* a través de un archivo formato json, “NSFNet.json”, definiendo sus 14 nodos y 42 enlaces detallando nodo de origen, nodo de destino, la distancia entre ellos y la cantidad de *slots* necesarios dependiendo en que banda del espectro se trabaje. En la Figura 3.1, se muestra la distribución de nodos y enlaces, se destaca la menor distancia de 250 km entre los nodos 12 y 13, por otro lado, la mayor distancia es de 2840 ubicada entre los nodos 0 y 7. Esta topología entrega una cobertura total de 45.780 km. En cuanto a las rutas de esta topología, se incorporan al código mediante el archivo “NSFNet_routes.json” el cual muestra en detalle las rutas establecidas por cada nodo fuente a cada nodo de destino. La forma en que se elige cada ruta debe ser determinada por el usuario, esta es una de las ventajas de la flexibilidad del simulador, en este caso, las rutas llevan el orden de menor a mayor longitud en el archivo json.

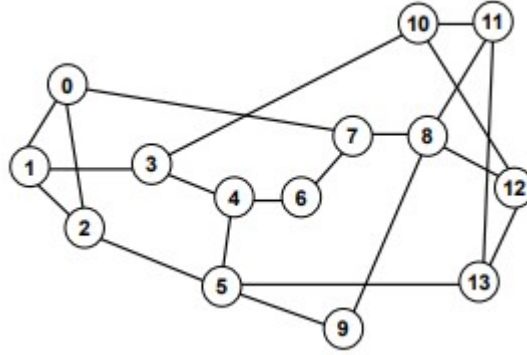


Figura 3.1: Topología de red NSFNet.

2. **Eurocore:** La topología Eurocore, se incorpora al código principal mediante el archivo json “EUROCORE.json”, definiendo sus 11 nodos y 50 enlaces, detallando en nodo de origen, destino, distancia entre ellos y la cantidad de *slots* disponibles dependiendo de la banda en que se trabaje. Además, entrega una cobertura total de 21.280 km, siendo su enlace de menor distancia entre el nodo 7 y el nodo 9 con 163 km y su enlace mas largo entre el nodo 2 y el nodo 3 con 875 km de distancia. Por otro lado, las rutas se incorporan al simulador por medio de el archivo “EUROCORE_routes.json” y de forma similar a la topología anterior, las rutas están ordenadas de menor a mayor longitud.

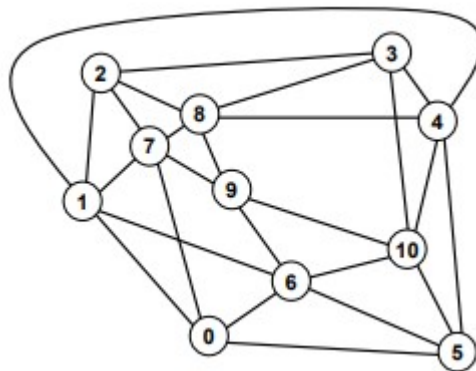


Figura 3.2: Topología de red Eurocore.

3.1.3. Formatos de modulación para banda C

El archivo “modclasicas7.json”, “modclasicas20.json” y “modoptimizadas20.json” contiene información de cada formato de modulación, tanto para formatos clásicos y formatos optimizados, para cada bitrate que se utilizó 10, 40, 100, 200, 400, 800 y 1000 Gbps. Para diferentes

tasa de bits entrega la cantidad de FSU requerida por cada formato de modulación (Tabla 3.2, Tabla 3.3 y Tabla 3.1) obtenidos de la siguiente ecuación:

$$FSU = \frac{BitRate}{\frac{b}{FSU} dualpolarization}$$

Modulación	10	40	100	200	400	800	1000
1024 QAM	0,043	0,172	0,430	0,860	1,720	3,441	4,301
256 QAM	0,054	0,215	0,538	1,075	2,151	4,301	5,376
128 DSQ2	0,061	0,246	0,614	1,229	2,458	4,916	6,144
64 QAM	0,072	0,287	0,717	1,434	2,867	5,735	7,168
32 CROSS2	0,086	0,344	0,860	1,720	3,441	6,882	8,602
16 QAM	0,108	0,430	1,075	2,150	4,301	8,602	10,752
8 PSK	0,143	0,573	1,433	2,867	5,735	11,469	14,337
QPSK	0,215	0,860	2,150	4,301	8,602	17,204	21,505

Tabla 3.1: FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.

Modulación	10	40	100	200	400	800	1000
1024 QAM	0.05	0.2	0.5	1	2	4	5
256 QAM	0.062	0.25	0.625	1.25	2.5	5	6.25
128 DSQ2	0.071	0.286	0.714	1.429	2.857	5.714	7.142
64 QAM	0.083	0.333	0.833	1.667	3.333	6.666	8.333
32 CROSS2	0.1	0.4	1	2	4	8	10
16 QAM	0.125	0.5	1.25	2.5	5	10	12.5
8 PSK	0.167	0.667	1.667	3.333	6.667	13.333	16.667
QPSK	0.25	1	2.5	5	10	20	25

Tabla 3.2: FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación clásicos con FEC de 20%.

Modulación	10	40	100	200	400	800	1000
1024 2DGS	0.05	0.2	0.5	1	2	4	5
256 2DGS	0.062	0.25	0.625	1.25	2.5	5	6.25
128 b2	0.071	0.286	0.714	1.428	2.857	5.714	7.142
64 2DGS	0.083	0.333	0.833	1.667	3.333	6.667	8.333
32 2DGS	0.1	0.4	1	2	4	8	10
16 2DGS	0.125	0.5	1.25	2.5	5	10	12.5
8 DSQ2	0.167	0.667	1.667	3.333	6.667	13.333	16.667
QPSK	0.25	1	2.5	5	10	20	25

Tabla 3.3: FSU necesarios por bitrate para formatos de modulación optimizados con FEC de 20%.

Por otro lado, se considera la relación señal/ruido (SNR) como métrica de desempeño para estimar el alcance máximo [24], mediante la siguiente ecuación:

$$SNR_{ch} = \frac{P_{ch}}{P_{ASE,ch} + \eta P_{ch} P_{ch}^3}$$

se obtiene el gráfico de la Figura 3.3 que relaciona SNR con distancia. De acuerdo a los valores de SNR se tiene el alcance máximo de cada uno de los formatos de modulación, se puede visualizar en la Tabla 3.5, Tabla 3.6 y Tabla 3.4. Los valores obtenidos también se pueden visualizar en el Anexo 6.3. Recordar que para las primeras simulaciones sólo se trabajará en la banda C del espectro.

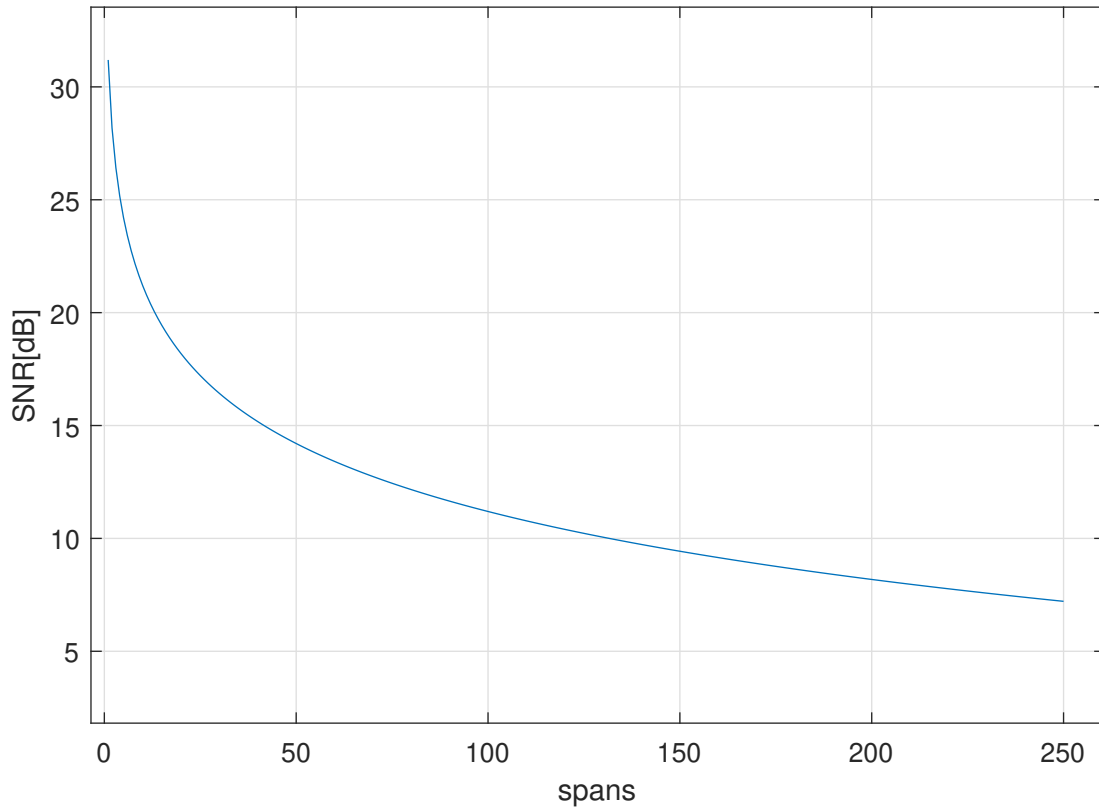


Figura 3.3: Spans vs SNR en la banda C.

Formato Modulación	SNR	Reach (km)
1024 QAM		0
256 QAM	25.5	300
128 DSQ2	22.5	700
64 QAM	19.8	1300
32 CROSS2	16.9	2500
16 QAM	14.0	5200
8 PSK	10.9	10400
QPSK	8.3	20800

Tabla 3.4: SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.

Formato Modulación	SNR	Reach (km)
1024 QAM	25.488	300
256 QAM	20.488	1100
128 DSQ2	19.782	1300
64 QAM	15.430	3700
32 CROSS2	13.122	6400
16 QAM	10.161	12700
8 PSK	8.107	20300
QPSK	4.072	25000

Tabla 3.5: SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 20%.

Formato de Modulación	SNR	Reach (km)
1024 2DGS	24.496	400
256 2DGS	19.877	1300
128 b2	19.411	1500
64 2DGS	15.003	4100
32 2DGS	12.574	7300
16 2DGS	10.117	12800
8 DSQ2	7.752	22000
QPSK	4.072	25000

Tabla 3.6: SNR y Reach para formatos de modulación optimizados con FEC 20%.

Para el caso FEC 7% se visualiza lo esperado, un alcance menor en comparación a FEC 20%, debido a que la tecnología que utiliza es más antigua. Las diferencias de SNR entre los formatos de modulación clásicos y optimizados con FEC de 20% varían entre 0,1 a 0,9 dB, lo que se traduce en una diferencia de alcances, los formatos de modulación optimizados ganan desde 100 km hasta 1700 km como se visualiza en la Tabla 3.7.

2D symbol/bits	Reach FM Clásicos FEC 7 % (km)	Reach FM Clásicos FEC 20 % (km)	Reach FM Optimizados FEC 20 % (km)
2	20800	25000	25000
3	10400	20300	22000
4	5200	12700	12800
5	2500	6400	7300
6	1300	3700	4100
7	700	1300	1500
8	300	1100	1300
10	0	300	400

Tabla 3.7: Tabla comparativa de Reach para cada grupo de formato de modulación.

Considerando el aumento de los formatos de modulación clásicos con un FEC 7% a FEC 20% se tienen las siguientes ganancias de alcance:

2D symbol/bits	Ganancia reach(%)
2	20,19
3	95,19
4	144,23
5	256
6	184,62
7	85,71
8	266,67
10	30000

Tabla 3.8: Porcentaje de ganancia FM clásicos con FEC 20% con respecto a FEC 7%

Análogo a lo anterior, se tienen las siguientes ganancias porcentuales de los formatos optimizados con un FEC 20% con respecto a los formatos clásicos con FEC de 20%.

2D symbol/bits	Ganancia reach(%)
2	0
3	8,37
4	0,79
5	14,06
6	10,81
7	15,38
8	18,18
10	33,33

Tabla 3.9: Porcentaje de ganancia FM optimizados con FEC 20% con respecto a FM clásicos con FEC 7%

3.1.4. Formatos de modulación para banda L+C+S

Similar a lo anterior, considerando SNR como métrica para estimar el alcance máximo se obtiene el gráfico de la Figura 3.4.

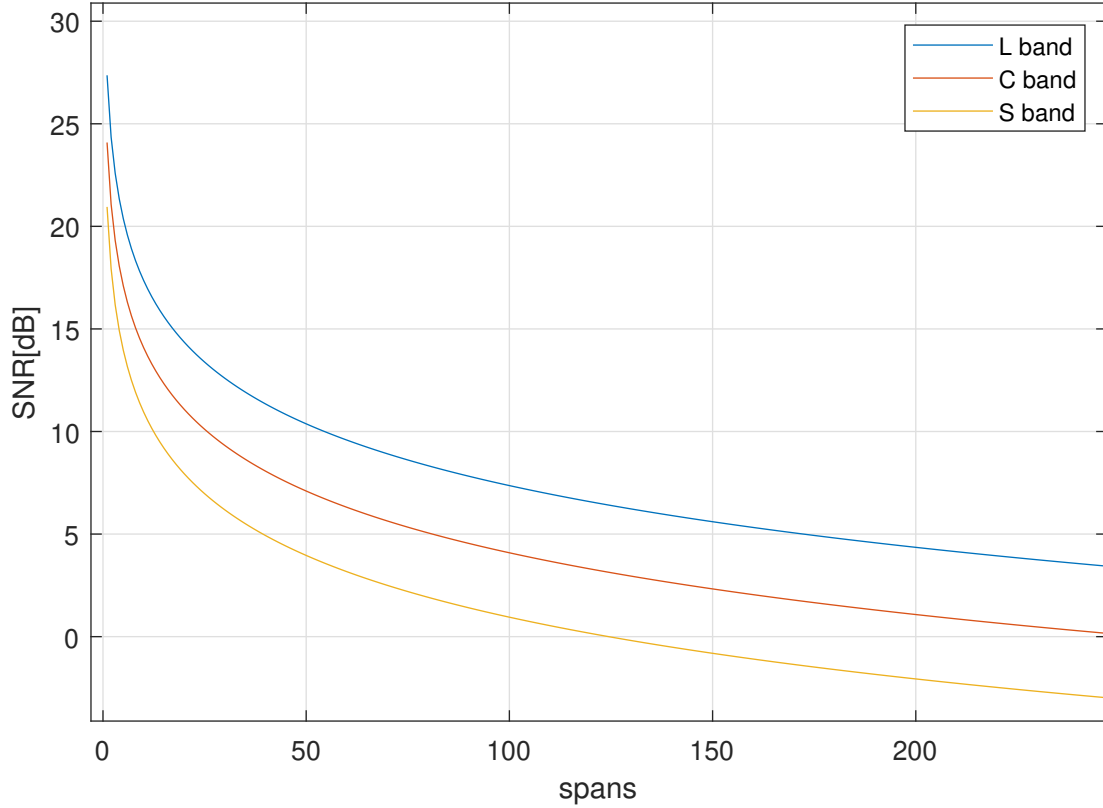


Figura 3.4: Spans vs SNR multibanda L, C y S.

Los valores de la Tabla 3.11, Tabla 3.12 y Tabla 3.10 se obtienen a partir del gráfico de la Figura 3.4, los valores obtenidos también se pueden visualizar en el Anexo 6.4.

Formato Modulación	SNR	Reach L (km)	Reach C (km)	Reach S (km)
1024 QAM		0	0	0
256 QAM	25.5	0	1	0
128 DSQ2	22.5	1	3	0
64 QAM	19.8	2	5	1
32 CROSS2	16.9	5	11	2
16 QAM	14.0	10	21	4
8 PSK	10.9	20	44	10
QPSK	8.3	37	80	18

Tabla 3.10: SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 7%.

Formato Modulación	SNR	Reach L (km)	Reach C (km)	Reach S (km)
1024 QAM	25.488	1	0	0
256 QAM	20.488	4	2	1
128 DSQ2	19.782	5	2	1
64 QAM	15.430	15	7	3
32 CROSS2	13.122	26	12	6
16 QAM	10.161	52	24	11
8 PSK	8.107	84	39	19
QPSK	4.072	213	100	48

Tabla 3.11: SNR y Reach para formatos de modulación clásicos con FEC 20 %.

Formato de Modulación	SNR	Reach L (km)	Reach C (km)	Reach S (km)
1024 2DGS	24.496	1	0	0
256 2DGS	19.877	5	2	1
128 b2	19.411	6	2	1
64 2DGS	15.003	17	8	3
32 2DGS	12.574	30	14	6
16 2DGS	10.117	53	24	12
8 DSQ2	7.752	91	43	20
QPSK	4.072	213	100	48

Tabla 3.12: SNR y Reach para formatos de modulación optimizados con FEC 20 %.

Para los formatos de modulación clásicos con FEC 20 %, es notorio el aumento de sus alcances con respecto a FEC 7 % en la mayoría de sus formatos y bandas. Por otro lado, similar a la simulación en banda C, en el caso multibanda, para los formatos de modulación optimizados con respecto a los clásicos con FEC de 20 %, al obtener reach para la banda L se visualiza una ganancia desde 1,92 % a 73,33 %, es decir por cada formato aumenta desde 1 hasta 7 km. En la banda C, se genera una ganancia de alcance en un intervalo de 10,26 % a 14,29 % lo que en distancia es de 2 a 4 km. Finalmente, en la banda S hay una ganancia de 1 km, lo que de forma porcentual significa un aumento en un intervalo de 5,26 % a 9,09 %.

4. Resultados experimentales

4.1. Simulación Banda C

En el diagrama de la Figura 4.1 muestra el funcionamiento del código principal para asignar recursos en una simulación en la banda C. De acuerdo a cada solicitud de conexión, en este caso 1.000.000 de conexiones, se debe asignar una ruta, un formato de modulación y un espacio en el espectro, de esta forma la conexión sería aceptada, resolviendo la asignación de recursos de la forma RMSA.

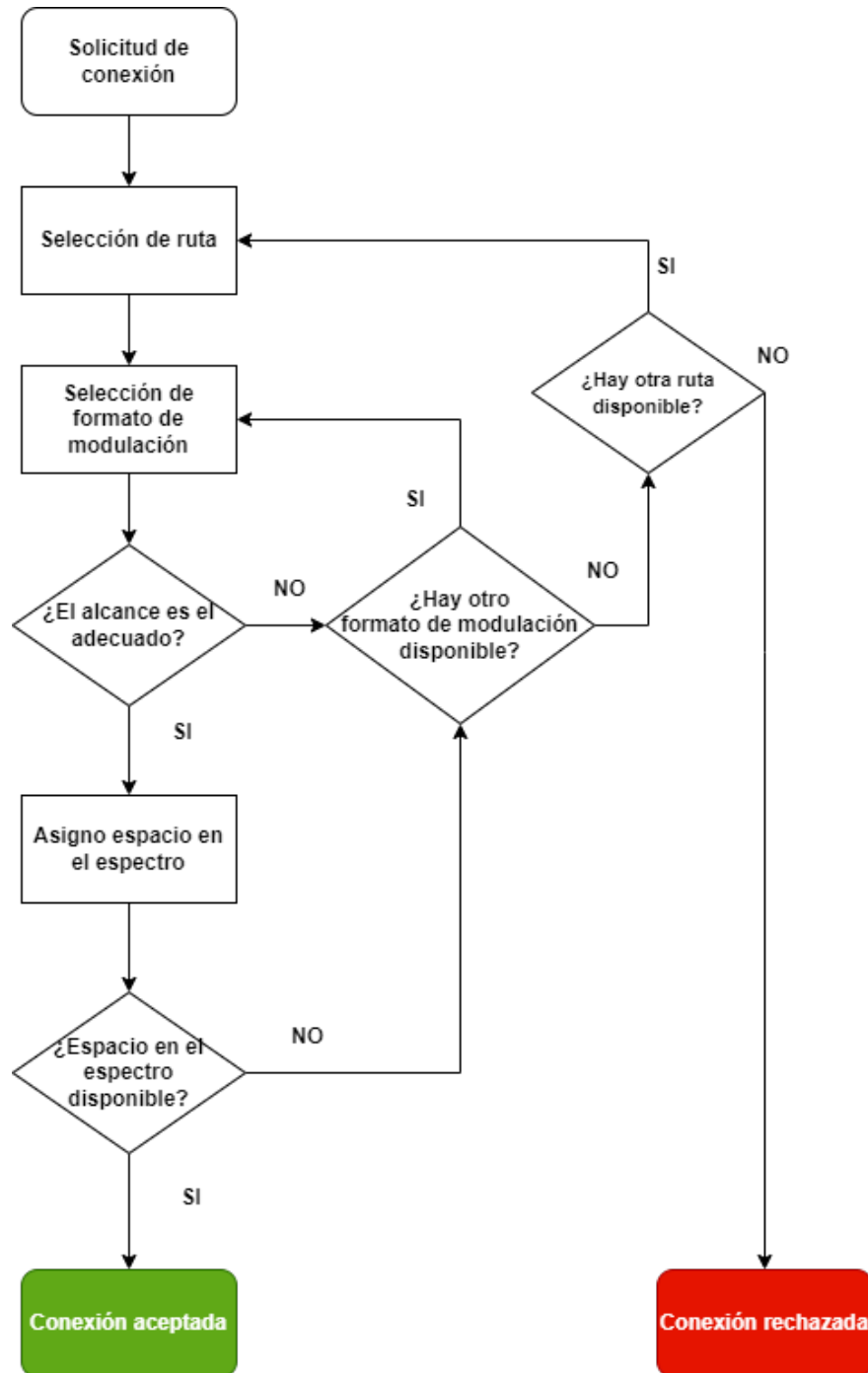


Figura 4.1: Diagrama de funcionamiento simulación en banda C.

4.1.1. Escenario 1: NFSNET

Se considera evaluar la calidad de la red mediante la probabilidad de bloqueo entregada por el simulador, la cual es tabulada con respecto a la carga de tráfico, considerando una carga de 100 hasta 1500 Erlang. En donde se notó una mayor diferencia de probabilidad de bloqueo, se

tabula la probabilidad de bloqueo con intervalos menores de carga de tráfico, en este caso, desde los 300 a los 600 Erlang, pasando así por 250, 450, 550, 650 y 750 Erlang.

Traffic Load	BP FM Clásicos FEC 7 %	BP FM Clásicos FEC 20 %	BP FM Optimizados FEC 20 %
100	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
200	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
300	4,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
350	2,70E-05	1,00E-06	2,50E-07
400	2,60E-04	1,00E-05	6,00E-06
450	1,60E-03	1,80E-04	6,90E-05
500	4,90E-03	1,00E-03	5,80E-04
550	1,10E-02	3,10E-03	2,30E-03
600	1,80E-02	6,80E-03	5,60E-03
650	2,60E-02	1,20E-02	1,00E-02
700	3,50E-02	1,90E-02	1,60E-02
750	4,40E-02	2,60E-02	2,30E-02
800	5,30E-02	3,30E-02	3,00E-02
900	7,10E-02	4,80E-02	4,50E-02
1000	8,80E-02	6,30E-02	5,90E-02
1100	1,00E-01	7,70E-02	7,40E-02
1200	1,20E-01	9,20E-02	8,80E-02
1300	1,30E-01	1,00E-01	1,00E-01
1400	1,50E-01	1,20E-01	1,10E-01
1500	1,60E-01	1,30E-01	1,30E-01

Tabla 4.1: Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 1.

Para una carga de 450 Erlang es notoria la diferencia de probabilidad de bloqueo para un FEC de 20 %, pasando de 1,80E-04 a 6,90E-05, disminuyendo a la mitad las conexiones rechazadas. Para los formatos de modulación clásicos se rechazan 180 solicitudes de conexión, 139 en 1 Tbps y 41 en 800 Gbps, mientras que, para los formatos de modulación optimizados se rechazan 68 solicitudes de conexión, 58 en 1 Tbps y 10 en 800 Gbps. Es notorio visualmente y se puede apreciar en el gráfico de la Figura 6.13 y en la Figura 4.2. Además, en la Figura 4.3 se muestra la utilización de formatos de modulación, se distingue una mayor cantidad de conexiones aceptadas para los formatos de modulación optimizados en 6, 8 y 10 bits/2D symbol.

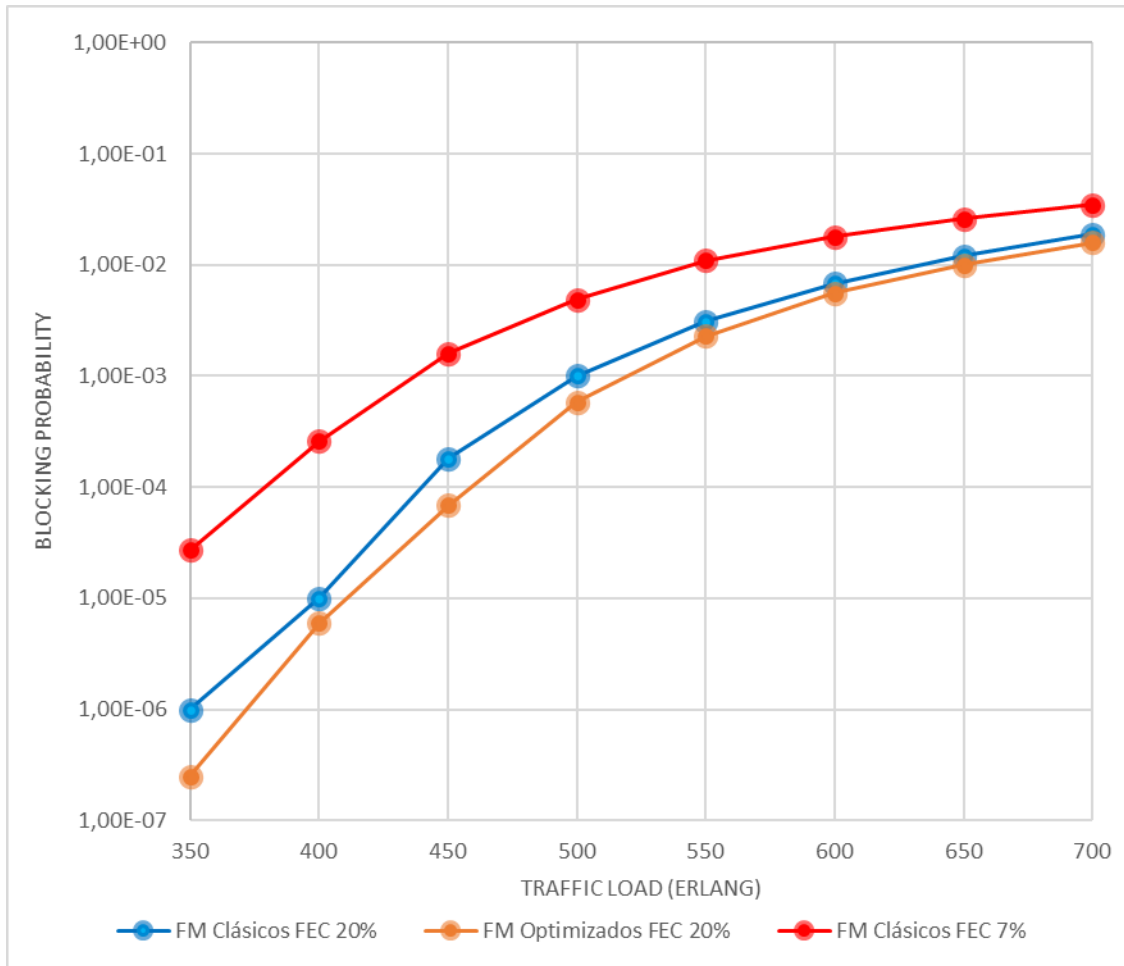


Figura 4.2: Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico para escenario 1.

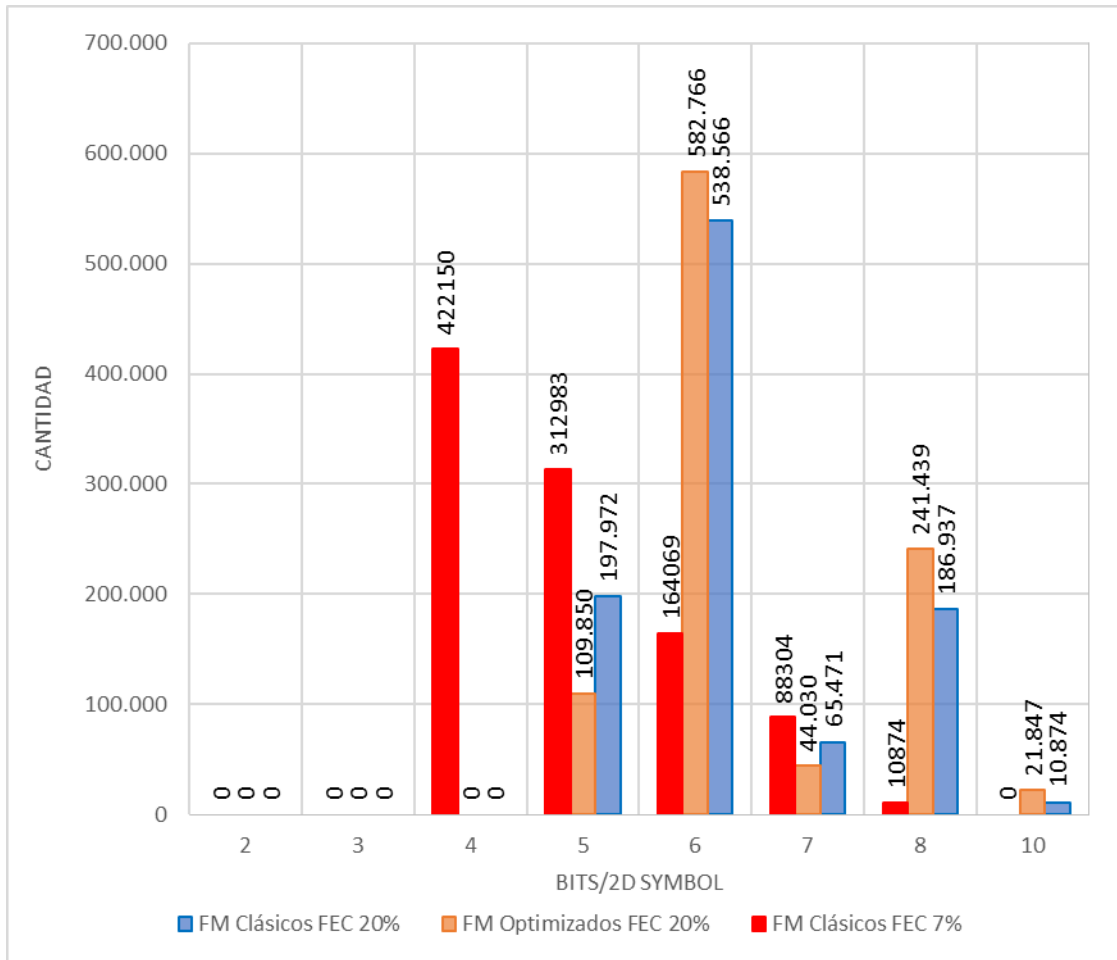


Figura 4.3: Utilización de formatos de modulación escenario 1 (450 Erlang).

4.1.2. Escenario 2: EUROCORE

Similar al escenario 1, pero utilizando la topología Eurocore. Esta topología al tener rutas mas cortas permite tener mayor disponibilidad del espectro, por lo que asignar recursos se vuelve mas eficiente que la anterior. Se considera un tráfico de datos desde los 500 hasta los 3000 Erlang.

Traffic Load	BP FM		BP FM
	Clásicos FEC 7 %	Clásicos FEC 20 %	Optimizados FEC 20 %
500	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
600	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
700	1,70E-05	5,00E-06	1,00E-06
750	6,00E-05	9,00E-06	2,00E-06
800	3,50E-04	3,30E-05	1,70E-05
850	9,10E-04	2,30E-04	5,00E-05
900	1,90E-03	4,90E-04	2,50E-04
1000	5,80E-03	2,60E-03	1,40E-03
1100	1,20E-02	6,70E-03	4,60E-03
1200	1,80E-02	1,30E-02	9,80E-03
1300	2,60E-02	1,90E-02	1,60E-02
1400	3,40E-02	2,60E-02	2,30E-02
1500	4,10E-02	3,40E-02	3,00E-02
1600	4,80E-02	4,10E-02	3,80E-02
1700	5,50E-02	4,80E-02	4,50E-02
1800	6,30E-02	5,50E-02	5,10E-02
1900	7,00E-02	6,20E-02	5,80E-02
2000	7,80E-02	6,90E-02	6,50E-02
2100	8,50E-02	7,60E-02	7,60E-02
2200	9,30E-02	8,30E-02	7,80E-02
2300	1,00E-01	9,00E-02	8,50E-02
2400	1,10E-01	9,80E-02	9,20E-02
2500	1,10E-01	1,00E-01	9,90E-02
3000	1,50E-01	1,40E-01	1,30E-01

Tabla 4.2: Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 2.

En la Figura 4.4 se muestran los resultados, para los formatos de modulación con FEC 7 % se obtiene lo esperado, una probabilidad de bloqueo mayor con respecto a FEC 20 %. Por otro lado, para los formatos de modulación optimizados se genera una probabilidad de bloqueo menor en comparación para los formatos clásicos. Se distingue la disminución de conexiones bloqueadas y la reducción de probabilidad de bloqueo de al menos cuatro veces. Para una carga de tráfico de 700 Erlang y para formatos de modulación con FEC de 20 % pasamos de una probabilidad

de bloqueo de los clásicos con $2,30E-04$ a $5,00E-05$. El uso de diferentes formatos de modulación para 700 Erlang se muestra en la Figura 4.5, la cual muestra que las simulaciones siguen una tendencia a usar constelaciones más densas para formatos optimizados.

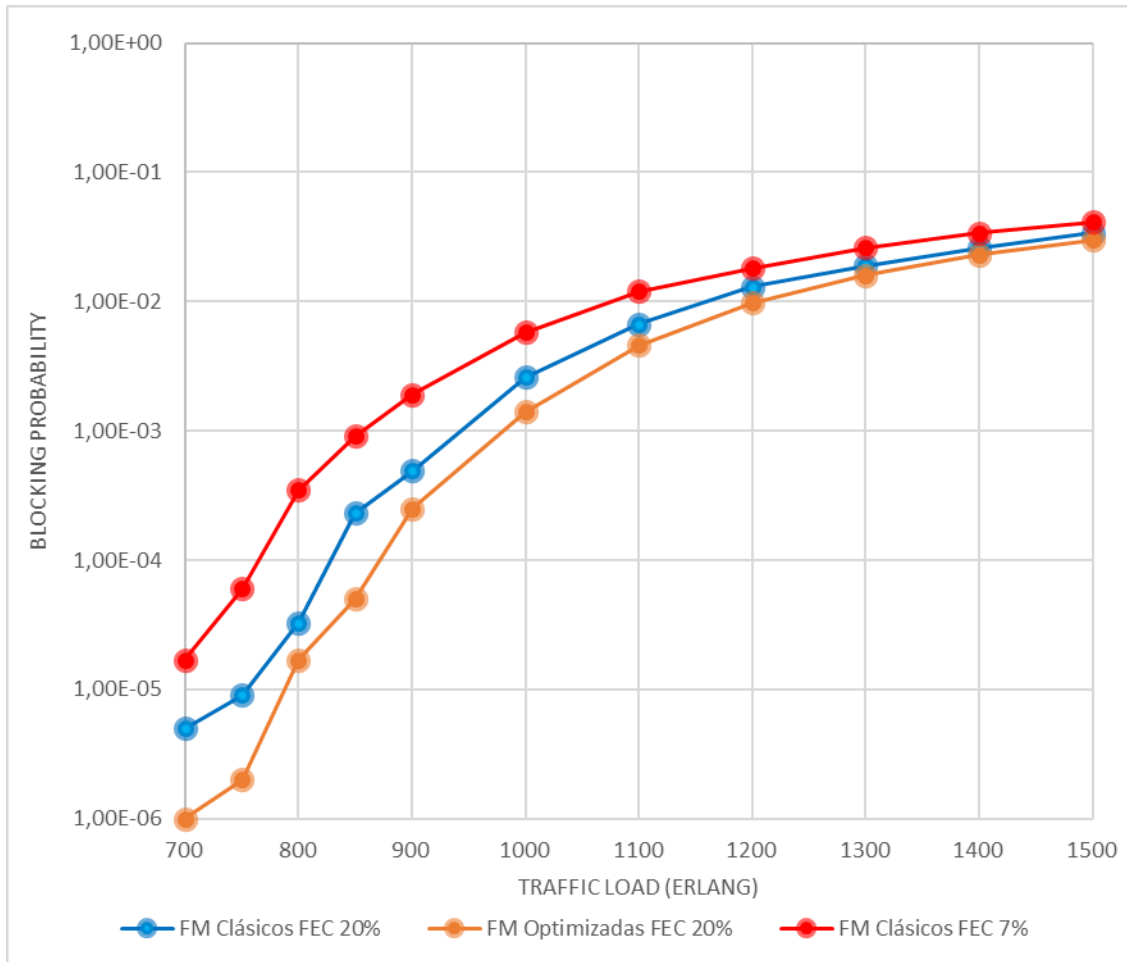


Figura 4.4: Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico para escenario 2.

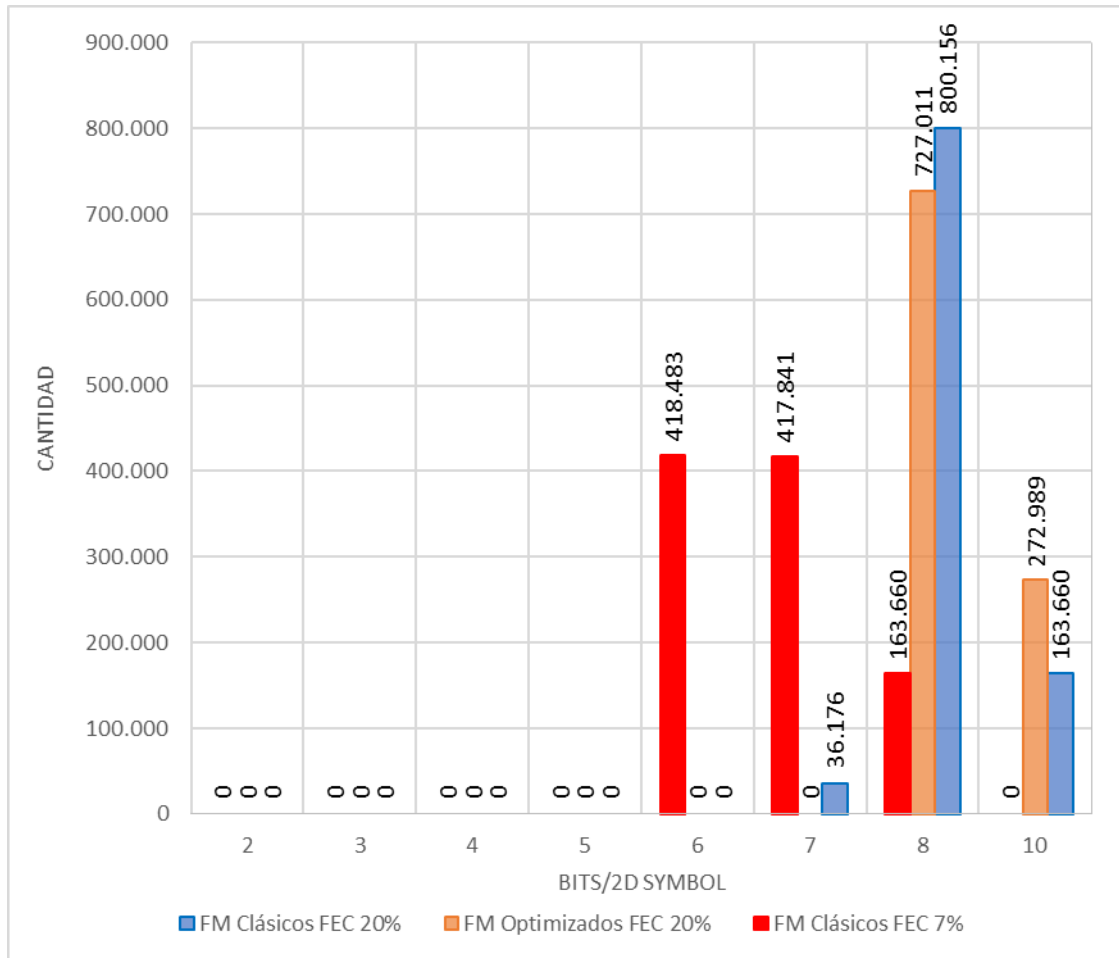


Figura 4.5: Utilización de formatos de modulación escenario 2 (700 Erlang).

4.2. Eficiencia espectral

Se resumen los resultados de eficiencia espectral en la Tabla 4.3, donde en el escenario 1, se visualiza un aumento en eficiencia espectral de 6,948 [b/s/Hz] en FEC 7% a 7,779 [b/s/Hz] en FEC 20%, en éste ultimo caso, la optimización de la red se visualiza en la mayor cantidad de conexiones aceptadas, es decir, donde la probabilidad de bloqueo es menor para los formatos de modulación optimizados. En el escenario 2, para los formatos de modulación clásicos con FEC 7% se tiene una eficiencia de 7,763 [b/s/Hz], para FEC 20% para los formatos de modulación clásicos se tiene 8,678 [b/s/Hz] y para los formatos de modulación optimizados 9,350 [b/s/Hz], donde claramente la red se ve optimizada.

	FM Clásicas FEC 7%	FM Clásicas FEC 20%	FM Optimizadas FEC 20%
Escenario 1 (450 Erlang)	6,948	7,779	7,779
Escenario 2 (750 Erlang)	7,763	8,678	9,350

Tabla 4.3: Resumen eficiencia espectral medido en [b/s/Hz].

4.3. Simulación Bandas S, C y L

El esquema de la Figura 4.6 muestra la asignación de recursos, siguiendo el orden RMBSA, es decir, para cada conexión entre las 1.000.000 de las posibles conexiones, se debe asignar una ruta, un formato de modulación, seleccionar banda (L, C o S) y un espacio en el espectro. Si lo anterior, se asigna sin inconvenientes se genera una conexión aceptada, por otro lado, si no se asigna un recurso de manera satisfactoria, se contabiliza una conexión rechazada.

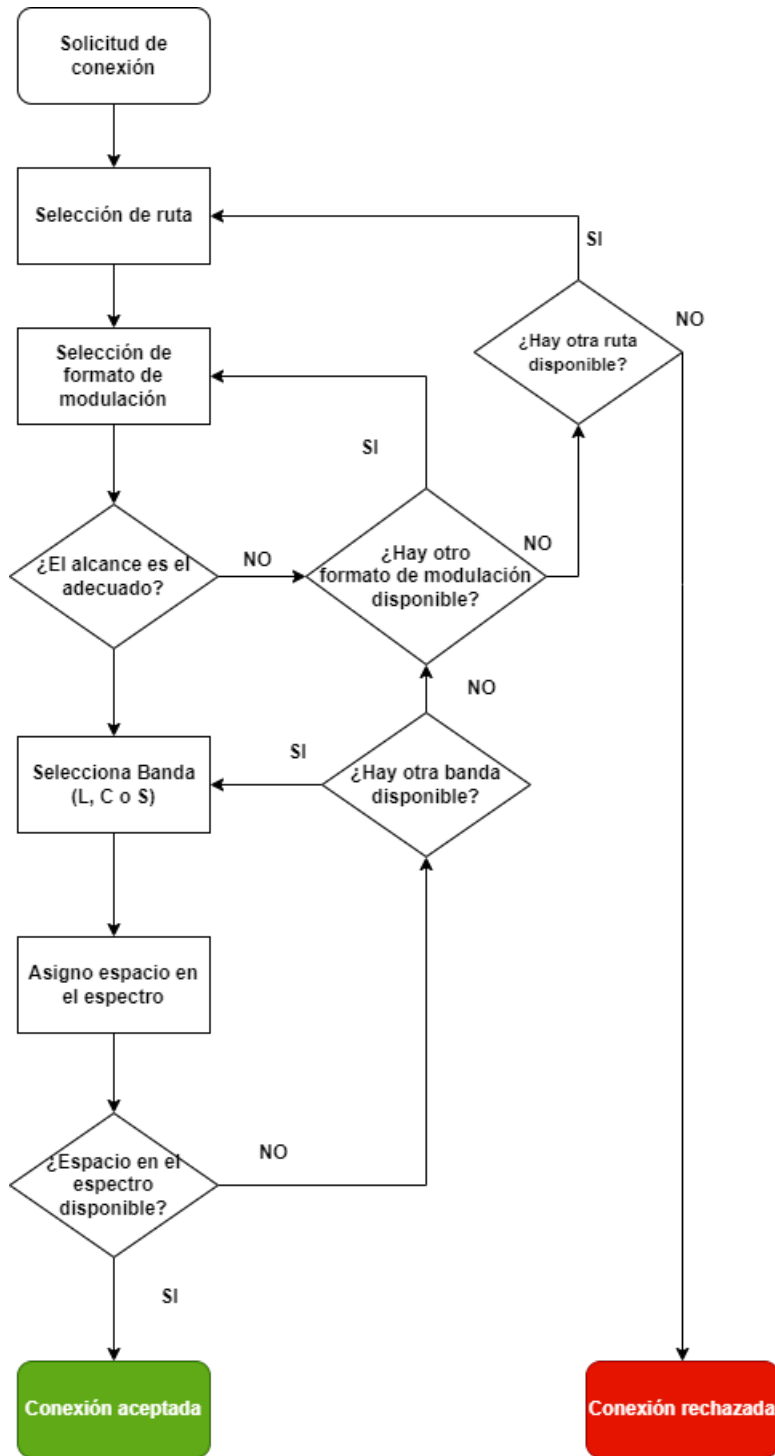


Figura 4.6: Diagrama de funcionamiento simulación multibanda L, C y S.

4.3.1. Escenario 1: NSFNet

El escenario 1 contempla la topología de red NSFNet, carga de tráfico desde los 1000 hasta los 2600 Erlang y se trabaja con formatos de modulación clásicos y optimizados, con un FEC de

7% y 20%. En comparación al escenario 1 de la simulación en banda C, se presenta una carga de tráfico de hasta 1000 Erlang de diferencia, sin embargo, el grupo de formatos de modulación optimizados presenta un aumento de la probabilidad de bloqueo con respecto a los formatos clásicos con FEC 20%.

Traffic Load	BP FM	BP FM	BP FM
	Clásicos FEC 7%	Clásicos FEC 20%	Optimizados FEC 20%
1000	6,90E-02	2,30E-05	1,20E-05
1200	8,30E-02	3,10E-03	4,10E-03
1400	9,60E-02	1,20E-02	1,40E-02
1600	1,10E-01	2,50E-02	2,70E-02
1800	1,20E-01	4,00E-02	4,30E-02
2000	1,30E-01	5,40E-02	5,60E-02
2200	1,40E-01	6,60E-02	6,90E-02
2400	1,50E-01	7,80E-02	8,10E-02
2500	1,60E-01	8,40E-02	8,60E-02
2600	1,60E-01	8,90E-02	9,10E-02

Tabla 4.4: Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 1 multibanda.

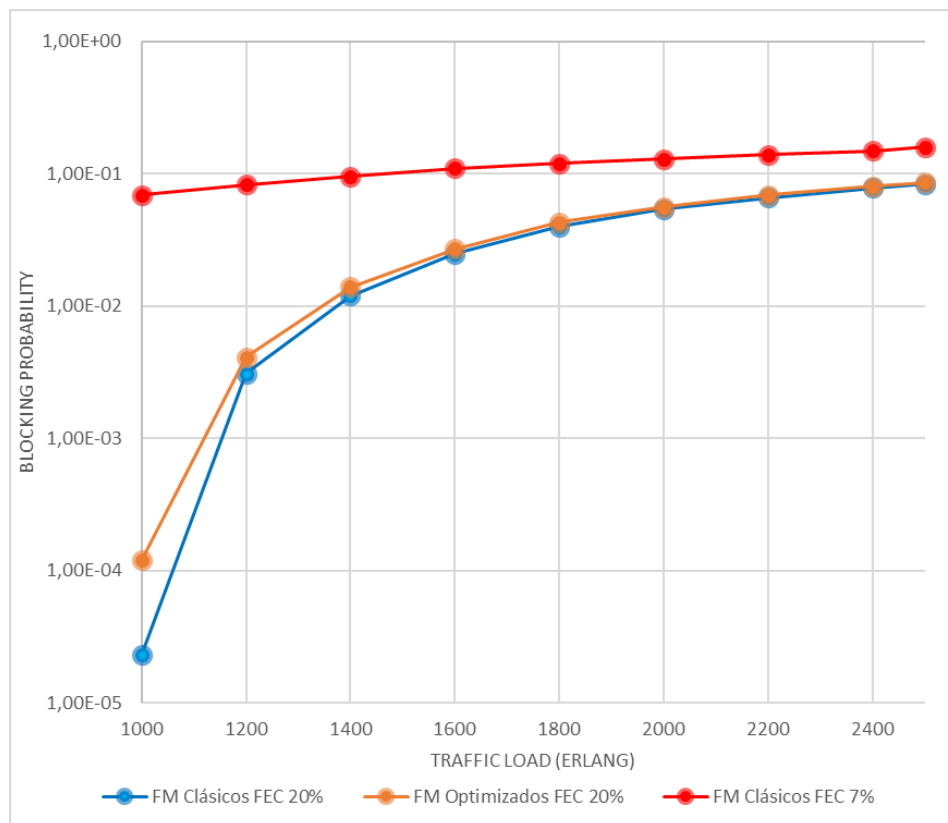


Figura 4.7: Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico.

4.3.2. Escenario 2: EUROCORE

En este escenario favorece la distancia de rutas lo que permite que la distribución de recursos se haga mas eficiente, permitiendo una carga de tráfico hasta los 10000 Erlang. Con FEC de 7% se obtiene lo esperado, la probabilidad de bloqueo es mayor que en FEC 20%. Con los formatos de modulación optimizados se reduce la probabilidad de bloqueo desde los 2800 a los 4000 Erlang aproximadamente, con respecto a los formatos de modulación clásicos. Ésto se puede visualizar a continuación.

Traffic Load	BP FM Clásicos FEC 7%	BP FM Clásicos FEC 20%	BP FM Optimizados FEC 20%
2800	1,40E-03	5,00E-06	1,00E-06
3000	3,50E-03	8,40E-05	2,80E-05
3200	7,20E-03	4,50E-04	2,10E-04
3400	1,20E-02	1,40E-03	9,70E-04
4000	2,90E-02	9,90E-03	9,10E-03
5000	5,60E-02	3,40E-02	3,20E-02
6000	7,90E-02	5,70E-02	5,60E-02
7000	1,00E-01	7,60E-02	7,60E-02
8000	1,20E-01	9,30E-02	9,30E-02
9000	1,40E-01	1,10E-01	1,10E-01
10000	1,50E-01	1,20E-01	1,20E-01

Tabla 4.5: Carga de tráfico y probabilidad de bloqueo para escenario 2 multibanda.

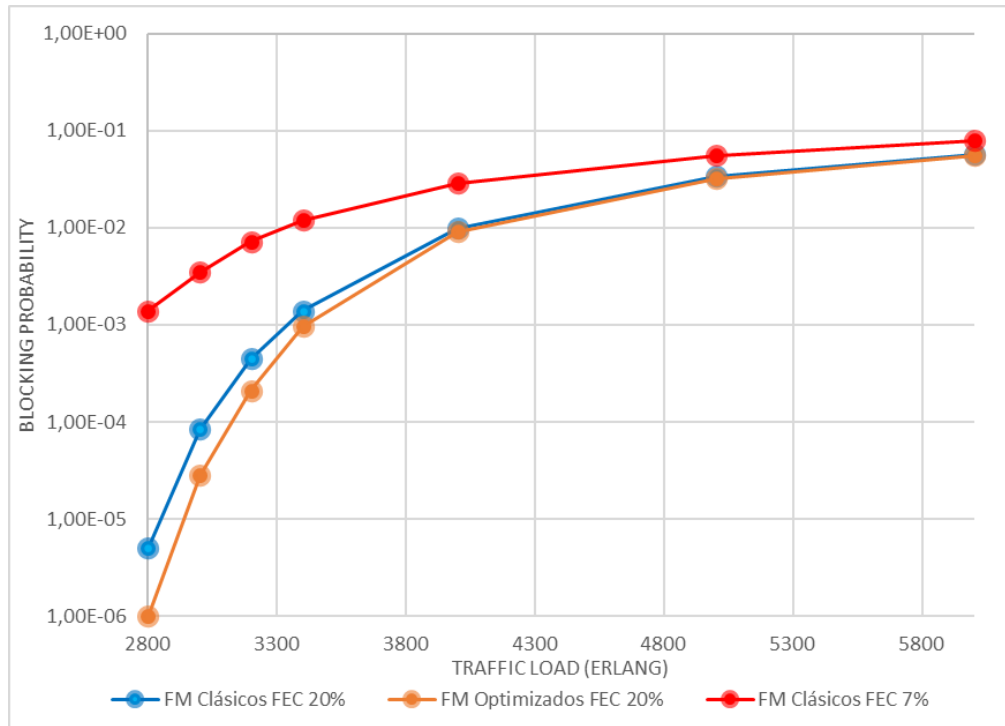


Figura 4.8: Probabilidad de bloqueo con respecto a la carga de tráfico.

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones

Se han considerado diferentes escenarios de simulación de redes ópticas, logrando los objetivos planteados. Finalizando, se presentan las siguientes conclusiones:

- Mediante los gráficos obtenidos, se deja en evidencia la mejora de la calidad de una red óptica al utilizar los recursos de manera eficiente. Para las simulaciones en el escenario 1, en la banda C, específicamente para los 450 Erlang, existe una disminución de la probabilidad de bloqueo de un 89 %, al utilizar los formatos de modulación clásicos FEC 20 % con respecto a FEC 7 %. Por otro lado, al utilizar los formatos de modulación optimizados con FEC 20 %, se mejora la probabilidad de bloqueo en un 62 % con respecto a los formatos de modulación clásicos con FEC 20 %. Para el escenario 2, en los 700 Erlang, al pasar de utilizar los formatos de modulación clásicos con FEC 7 % a FEC 20 %, la probabilidad de bloqueo se reduce en un 71 %. Al utilizar los formatos de modulación optimizados con FEC 20 % se obtiene una reducción de un 80 % de la probabilidad de bloqueo.
- Para las simulaciones multibanda, en el escenario 1 (1200 Erlang), al utilizar los formatos de modulación optimizados con FEC 20 %, disminuye un 95 % la probabilidad de bloqueo con respecto a FEC 7 %, y al utilizar los formatos de modulación clásicos con FEC 20 % se aumenta la probabilidad de bloqueo un 24 %, con respecto a los optimizados. Por otro lado, para el escenario 2 (3200 Erlang), al pasar de un formato de modulación clásicos FEC 7 % a FEC 20 %, disminuye la probabilidad de bloqueo un 94 %, por otro lado, al utilizar los formatos de modulación optimizados con FEC 20 %, la probabilidad de bloqueo disminuye un 53 %, con respecto a la probabilidad de bloqueo de los formatos de modulación clásicos con FEC 20 %.
- La diferencia entre los escenarios planteados son las topologías utilizadas. Eurocore posee una mayor cantidad de enlaces, rutas más cortas y una cobertura menor que NSFNet, lo que permite que el recurso de rutas se mantenga por más tiempo disponible, lo que se traduce en una mayor eficiencia óptica de la red en los escenarios simulados tanto en la banda C como en multibanda.

- Las redes ópticas elásticas multibanda se posicionan como una de las grandes soluciones ante el colapso de la banda C de transmisión de datos, brindando consecuencias en la innovación de la industria, latencia, energía y neutralidad de la red.
- El método *Geometric Constellation Shaping* para formatos de modulación es parte de investigaciones recientes, por lo que combinar las EON con éste método debe seguir en estudio. En este caso, el uso de los formatos de modulación optimizados brinda ganancia en alcances y reduce la probabilidad de bloqueo en ciertos escenarios.

5.2. Trabajo futuro

El simulador es un gran trabajo que da oportunidades para la investigación de las redes ópticas multibanda. Sin duda las EONs brindan soluciones y mejoras a las redes ópticas actuales, por lo mismo, a pesar de trabajar con simulaciones, queda como propuesta analizar el comportamiento de redes ópticas en multibanda en otros escenarios, para que en un futuro, sea un gran aporte a las comunicaciones.

Glosario

- **BER:** Bit Error Rate.
- **COVID-19:** Pandemia mundial Coronavirus disease 2019.
- **IRO:** Investigación en Redes Ópticas.
- **PAM-A:** Cable submarino de fibra óptica Pan-American Crossing.
- **POST:** Proyecto de Observación Submarina de Terremoto.
- **SAC:** South American Crossing.
- **SAM-1:** Sur América-1.
- **SDM:** Space Division Multiplexing.
- **SPSC:** Cable submarino de fibra óptica South Pacific Submarine Cable.
- **SubTel:** Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile.
- **Telxius:** Telxius Telecom S.A.
- **UIT-T:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

Referencias

- [1] Felipe Falcón, Gonzalo España and Danilo Bórquez Paredes.(2021) “Flex Net Sim: A Lightly Manual”.
- [2] R. W. Tkach, “Scaling optical communications for the next decade and beyond,” in Bell Labs Technical Journal, vol. 14, no. 4, pp. 3-9, Winter 2010, doi: 10.1002/bltj.20400.
- [3] R. J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, “Capacity Limits of Optical Fiber Networks,” Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no. 4, pp. 662–701, Feb 2010.
- [4] H. Kogelnik, BOn optical communication: Reflections and perspectives,[in Proc. ECOC, Stockholm, Sweden, 2004, Paper Mo1.1.1.
- [5] M. J. O’Mahony, C. Politi, D. Klionidis, R. Nejabati and D. Simeonidou, ”Future Optical Networks,in Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, pp. 4684-4696, Dec. 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.885765.
- [6] P. J. Winzer, “Optical Networking Beyond WDM,” in IEEE Photonics Journal, vol. 4, no. 2, pp. 647-651, April 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2189379.
- [7] A. R. Chraplyvy, BThe coming capacity crunch,[in Proc. ECOC, Vienna, Austria, 2009, plenary talk.
- [8] A. D. Ellis, N. Mac Suibhne, D. Saad, and D. N. Payne, “Communication networks beyond the capacity crunch,” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 374, no. 2062, 2016.
- [9] F. Calderón et al., “Heuristic Approaches for Dynamic Provisioning in Multi-Band Elastic Optical Networks,” in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 2, pp. 379-383, Feb. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3132054.
- [10] D. Bórquez-Paredes et al., “3R Regeneration in Elastic Optical Networks and its Impact on the Network Quality of Service,” 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203248.

- [11] F. I. Calderón et al., “BER-Adaptive RMLSA Algorithm for Wide-Area Flexible Optical Networks,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 128018-128031, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3008883.
- [12] A. Ferrari, E. Virgillito and V. Curri, ”Band-Division vs. Space-Division Multiplexing: A Network Performance Statistical Assessment,in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1041-1049, 1 March1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2970484.
- [13] Chile despliega un nuevo cable submarino y continúa impulsando su conectividad digital. (2021, 25 mayo). Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile. [Enlace](#)
- [14] Gobierno y GTD inauguraron en Arica cable submarino “Prat”, que proveerá de fibra óptica a gran parte del territorio nacional. (2021, 2 diciembre). Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile. [Enlace](#)
- [15] Conexiones fijas a Internet crecen 40 % durante el gobierno del Presidente Piñera. (2022, 9 Marzo). Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile. [Enlace](#)
- [16] L. Velasco, A. P. Vela, F. Morales and M. Ruiz, ”Designing, Operating, and Reoptimizing Elastic Optical Networks,in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 513-526, 1 Feb.1, 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2593986.
- [17] K. Wen et al., .Adaptive Spectrum Control and Management in Elastic Optical Networks,in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 39-48, January 2013, doi: 10.1109/JSAC.2013.130105.
- [18] Submarine Cable Map. (2022, 14 Julio). TeleGeography. [Enlace](#).
- [19] Mistral, Cable Submarino 132 Tbps. Telxius. [Enlace](#).
- [20] ¿Una Fibra y muchas señales?, Multiplexacion en fibra óptica lo soluciona. (2021,3 Septiembre). Comunidad Huawei Enterprise.
- [21] Martínez, J.L. (2019, 4 Enero). Ventanas de transmisión, PRORED. [Enlace](#)
- [22] Jane M. Simmons (). *Optical Network Design and Planning*. ISB: 978-0-387-76475-7, 2008.

- [23] Leiva L., Ariel, Ahumada C., Robert, Beghelli Z., Alejandra, & Olivares V., Ricardo. (2018). Algoritmo RMLSA para redes ópticas flexibles en operación dinámica. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 410-418. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000300410>
- [24] E. Paz and G. Saavedra, “Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing”, ArXiv: 2011.03671 (available at” <https://arxiv.org/pdf/2011.03671.pdf>), 2021.
- [25] A. Napoli et al., “Towards multiband optical systems,” in *Advanced Photonics 2018*, Optical Society of America, paper NeTu3E.1.
- [26] López M., Tobón D., Macea V., Ortiz B., “Corrector de errores hacia delante,” *Ingeniería Electronica IUE*, (<https://bibliotecadigital.iue.edu.co/jspui/handle/20.500.12717/450>), 2013.
- [27] L. Velasco, A. P. Vela, F. Morales and M. Ruiz, ”Designing, Operating, and Reoptimizing Elastic Optical Networks,in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 513-526, 1 Feb.1, 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2593986.
- [28] B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, *Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial*,in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, thirdquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2431731.
- [29] Govind P. Agrawal, 2010. “*Fiber-Optica Communication Systems* ”(4th ed), pag 1-250, A John Wiley & sons, inc., publication.
- [30] Govind P. Agrawal, 2010. “*Fiber-Optica Communication Systems* ”(4th ed), chapter 5, A John Wiley & sons, inc., publication.
- [31] B. C. Chatterjee, N. Sarma, E. Oki,“ *Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial*, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*” 17 (3) (2015) 1776–1800.
- [32] M. Jinno, H. Takara “Elastic optical path network architecture: Framework for spectrally efficient and scalable future optical networks”, *IEICE Transactions on Communications*, 2012,pp 706–71.

- [33] Danilo Bórquez, (10 y 11 de Noviembre de 2022). Nuevas tecnologías de fibra óptica y desafíos globales. Simposio SubOptic Latam 2022, Campus Santiago Universidad Adolfo Ibañez, Santiago, Chile.
- [34] B. C. Chatterjee, N. Sarma, E. Oki, “ Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial, IEEE Communications Surveys and Tutorials” 17 (3) (2015) 1776–1800.
- [35] B. Chen et al., ”Geometrically-Shaped Multi-Dimensional Modulation Formats in Coherent Optical Transmission Systems,” in Journal of Lightwave Technology, 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3204101
- [36] B. Chen, Y. Ni y A. Alvarado, “Binary Labeling for 2D and 4D constellations”, <https://github.com/TUe-ICTLab/Binary-Labelingfor-2D-and-4D-constellations>
- [37] V. Lohani, A. Sharma and Y. N. Singh, Routing, Modulation and Spectrum Assignment using an AI based Algorithm,”2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS), 2019, pp. 266-271, doi: 10.1109/COMSNETS.2019.8711172.

Anexos

6.3. Obtención de reach para simulación en banda C

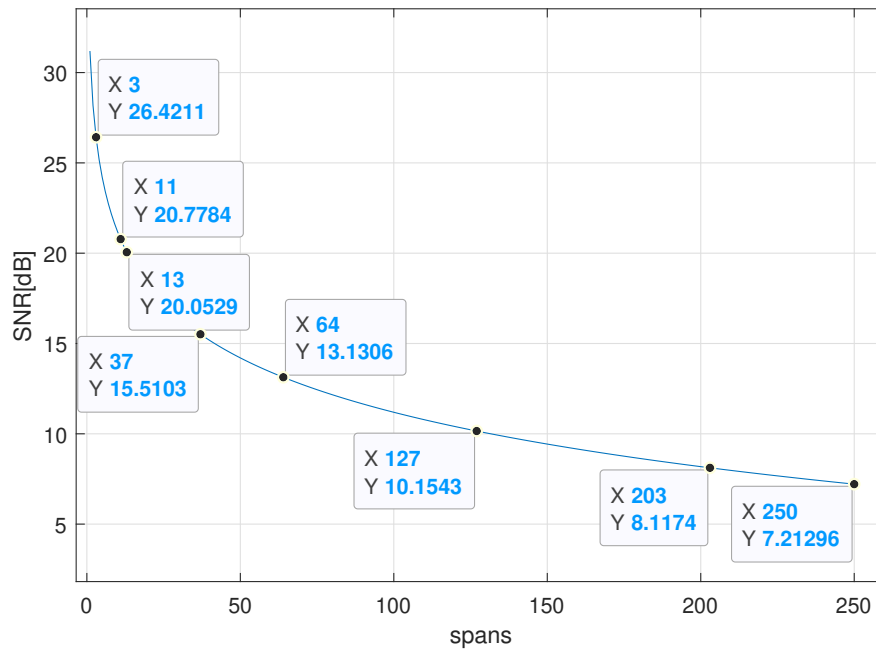


Figura 6.1: Banda C para FM clásicos FEC 20 %

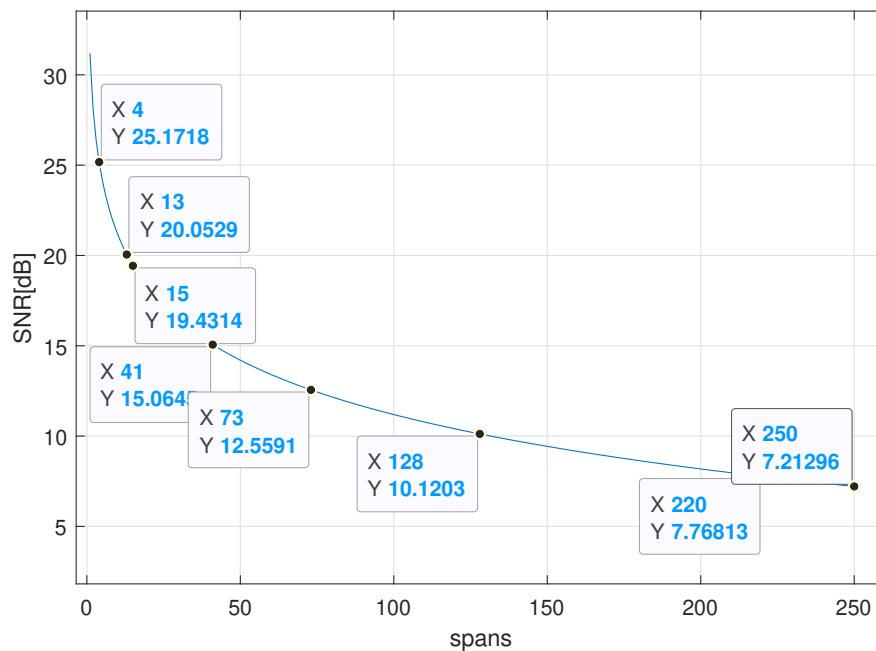


Figura 6.2: Banda C para FM optimizados FEC 20 %

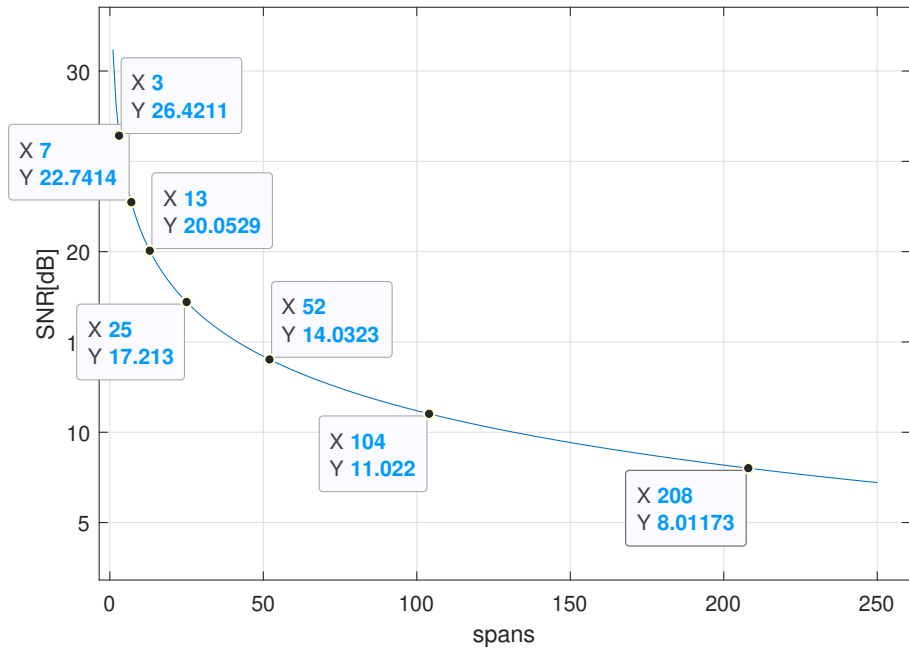


Figura 6.3: Banda C para FM clásicos FEC 7%

6.4. Obtención de reach para simulación en multibanda L, C y S

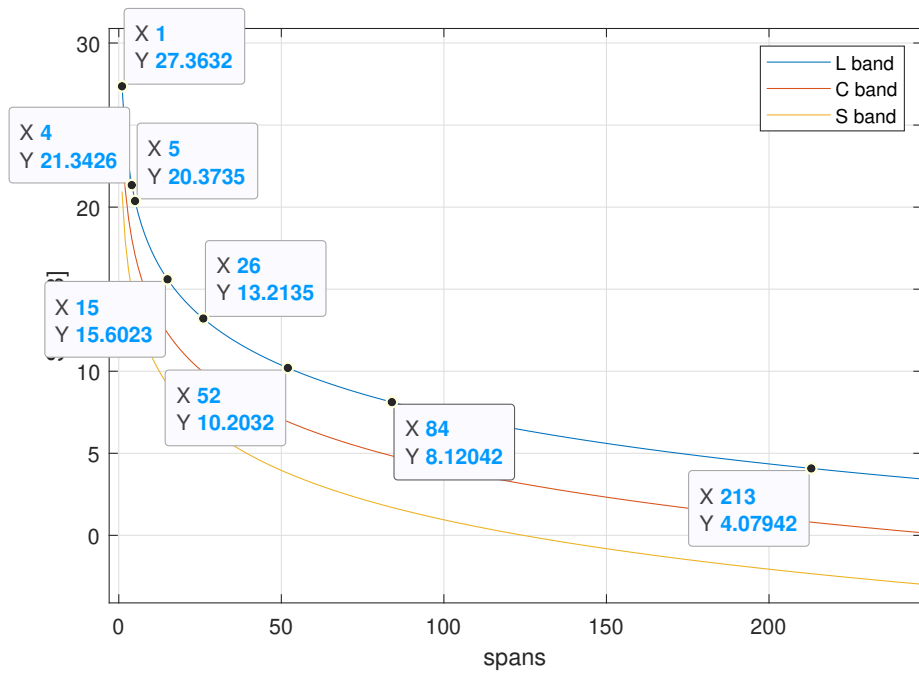


Figura 6.4: Banda L para FM clásicos FEC 20%

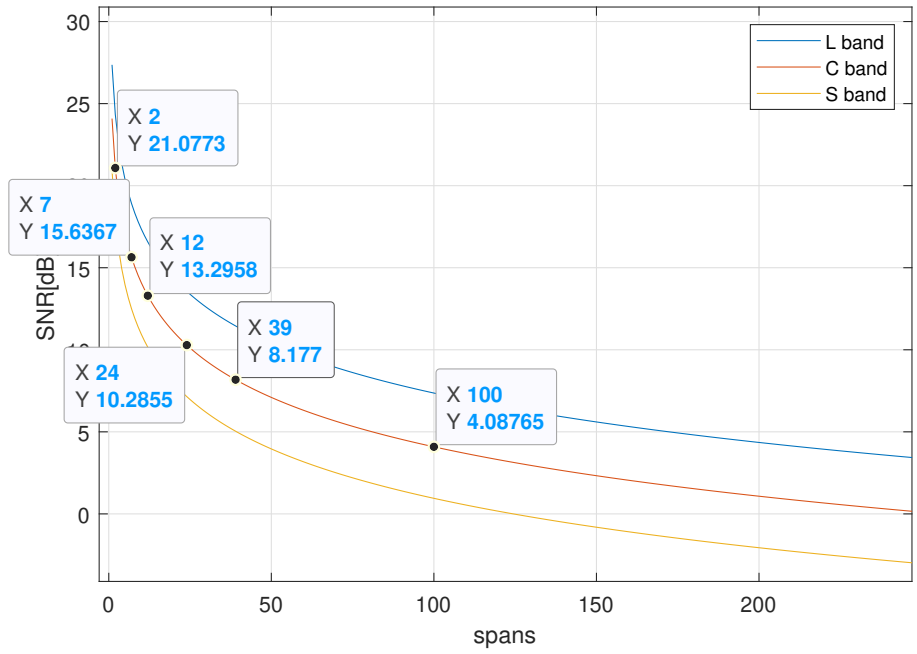


Figura 6.5: Banda C para FM clásicos FEC 20%

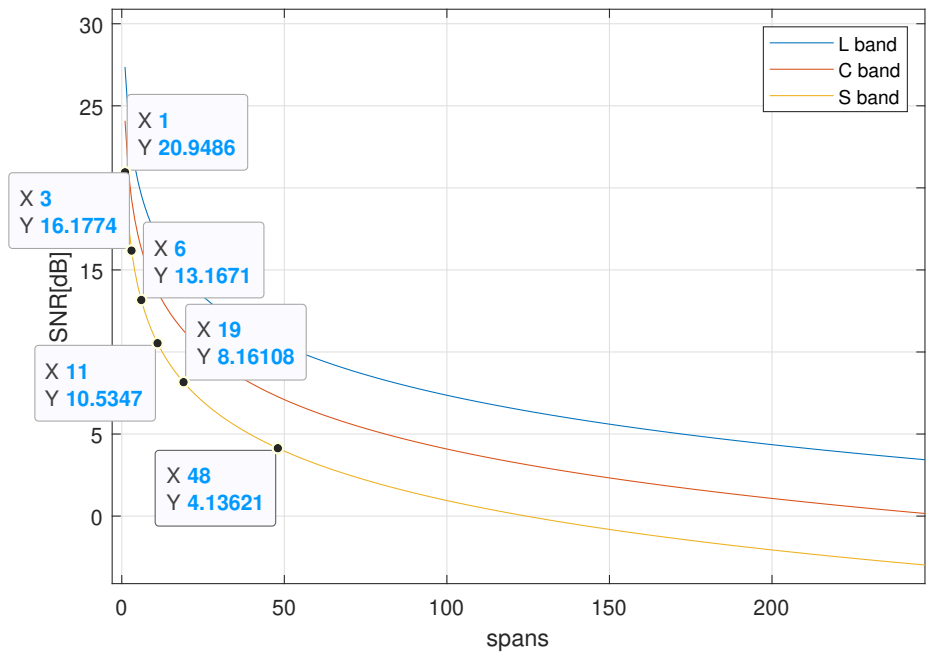


Figura 6.6: Banda S para FM clásicos FEC 20%

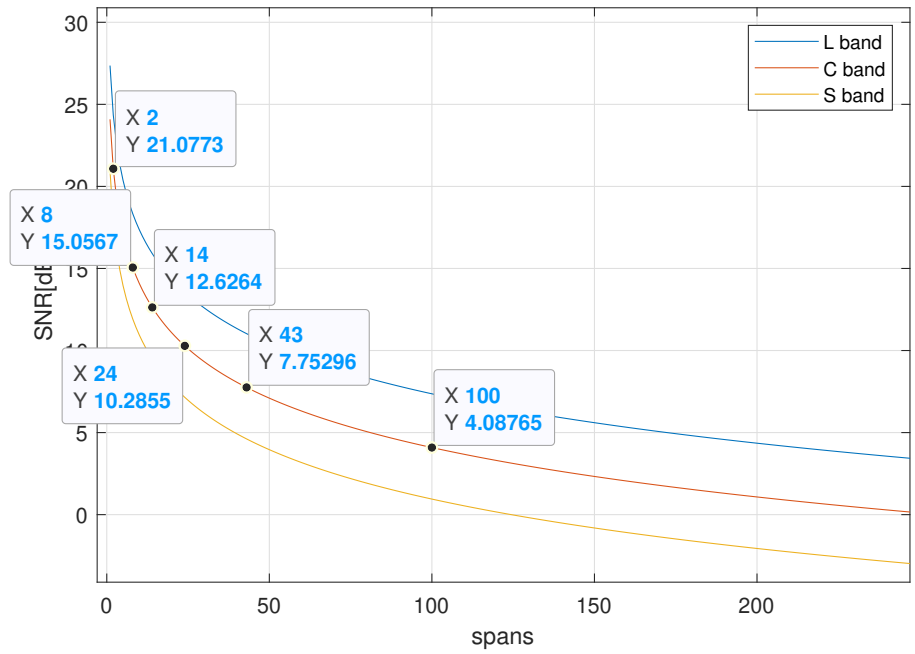


Figura 6.8: Banda C para FM optimizados FEC 20%

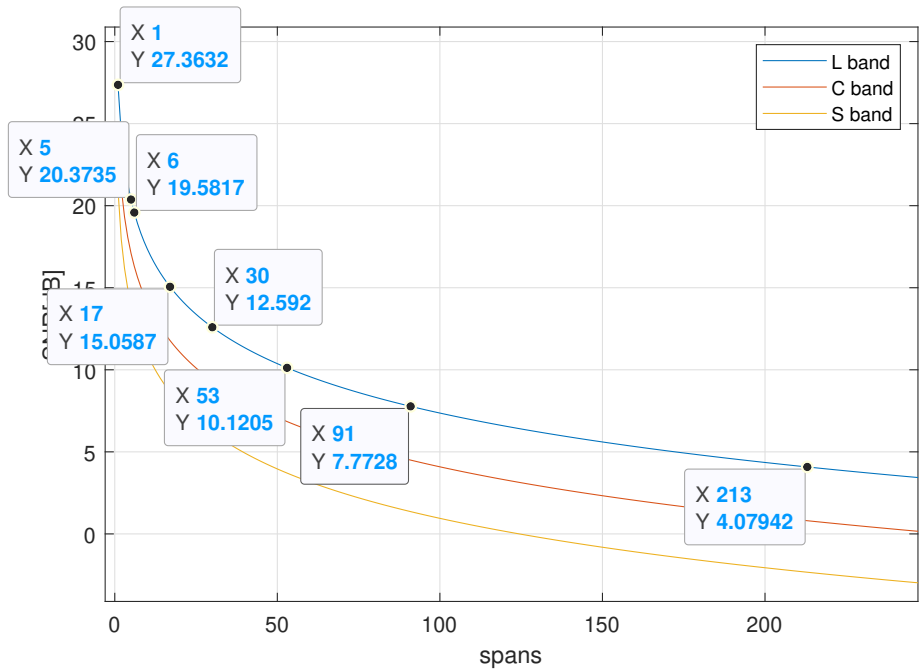


Figura 6.7: Banda L para FM optimizados FEC 20%

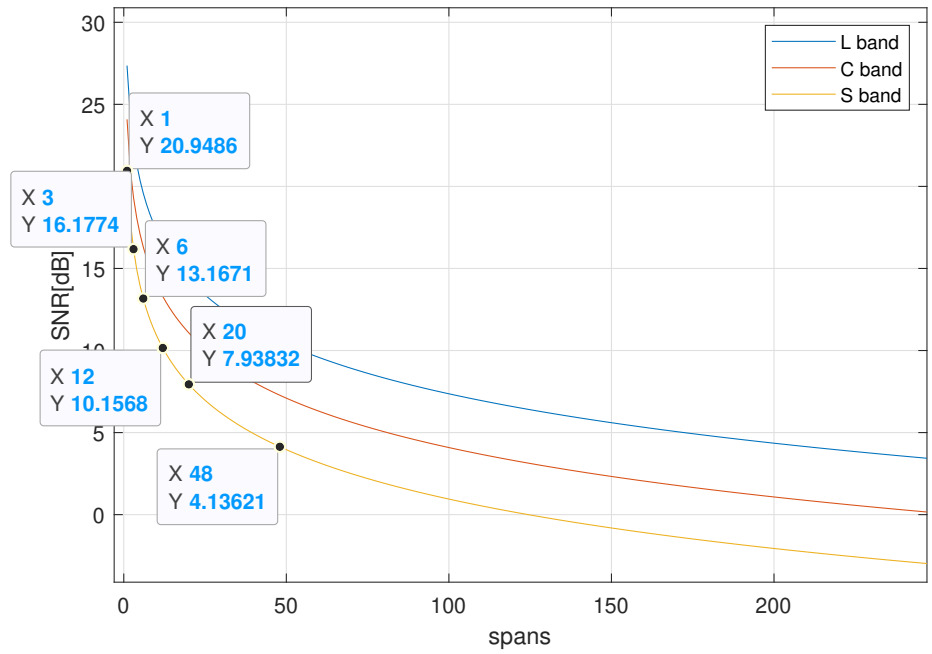


Figura 6.9: Banda S para FM optimizados FEC 20 %

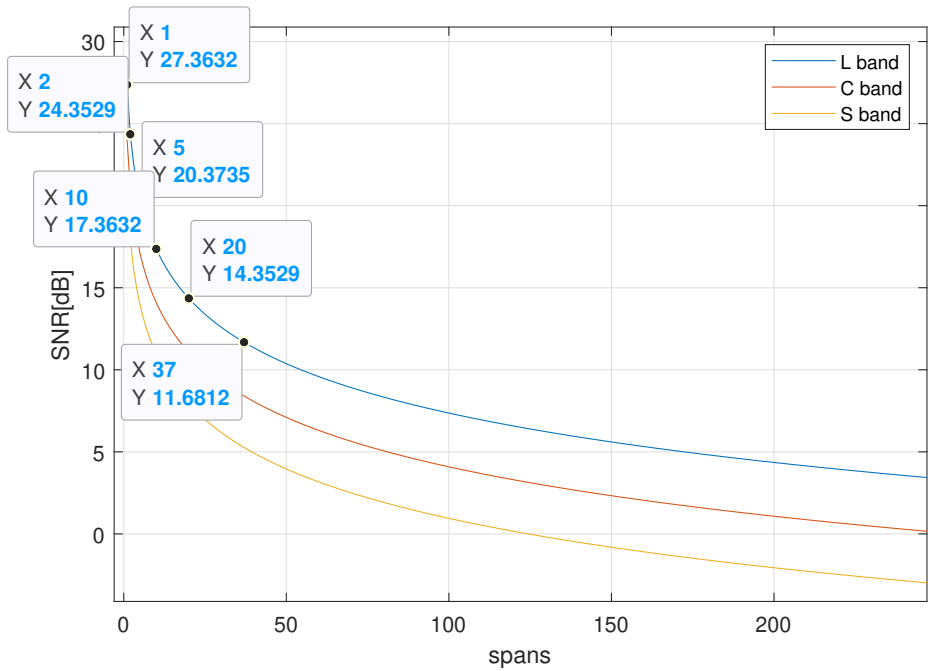


Figura 6.10: Banda L para FM clásicos FEC 7 %

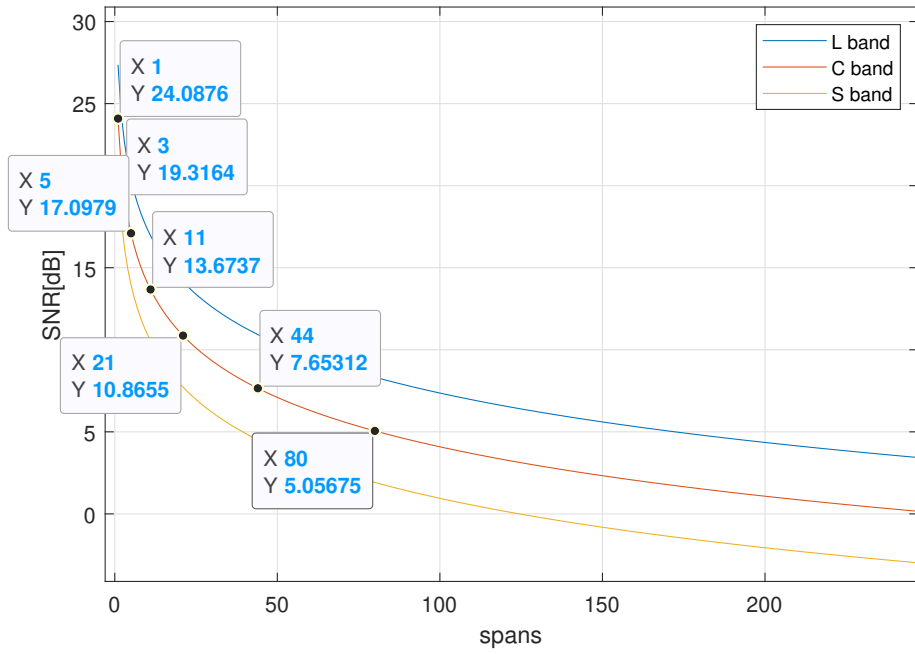


Figura 6.11: Banda C para FM clásicos FEC 7%

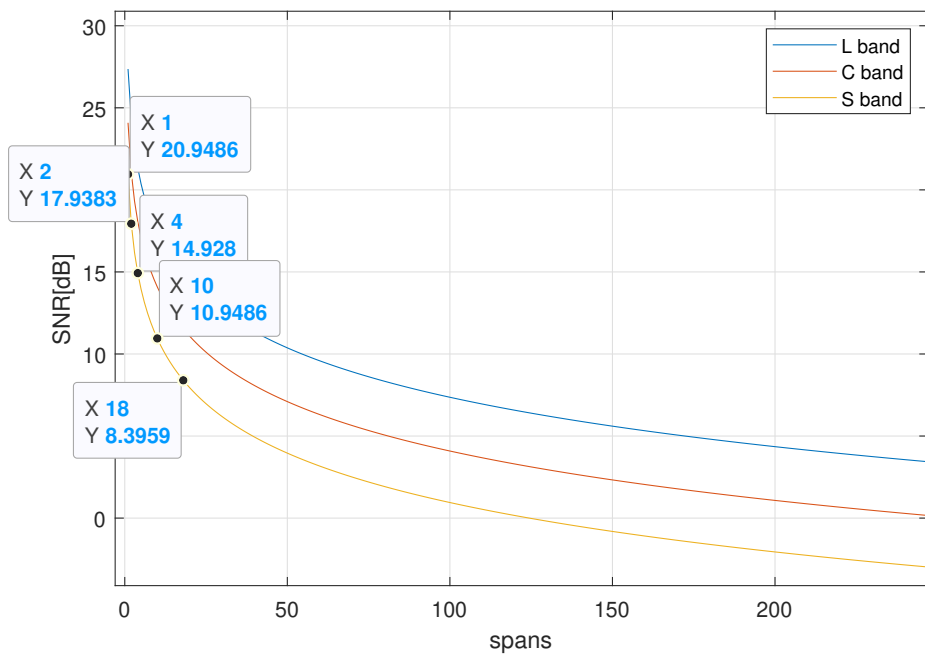


Figura 6.12: Banda S para FM clásicos FEC 7%

6.5. Conexiones rechazadas en la banda C

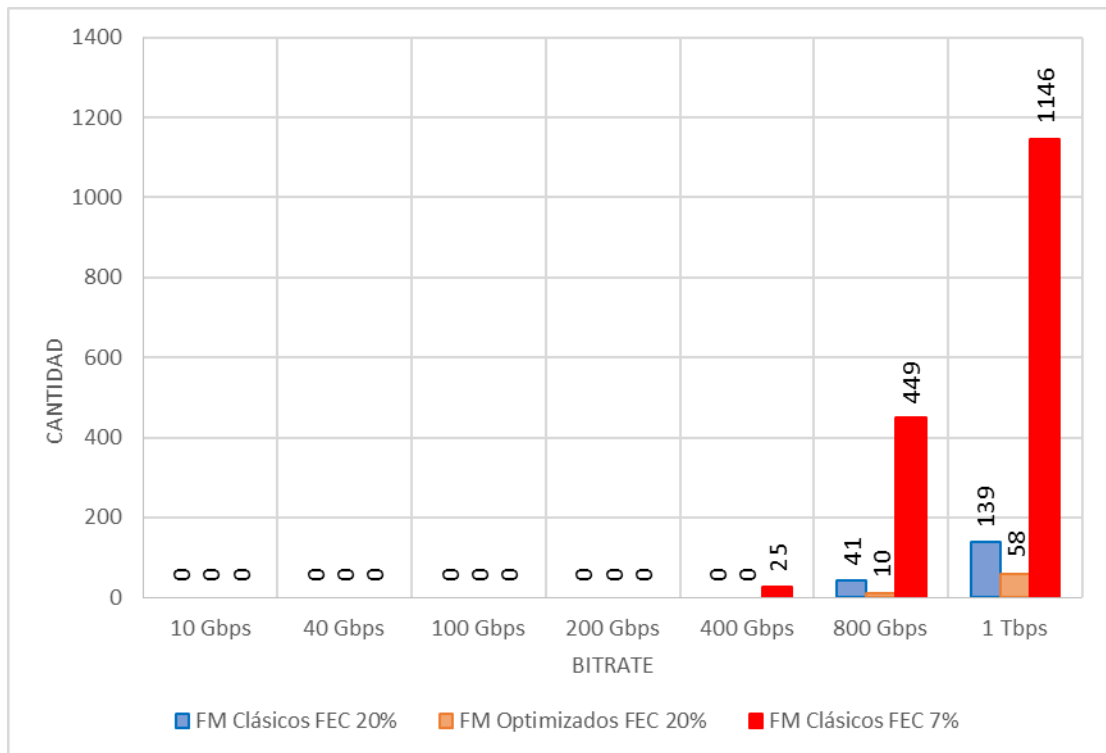


Figura 6.13: Solicitudes de conexión rechazadas para escenario 1.

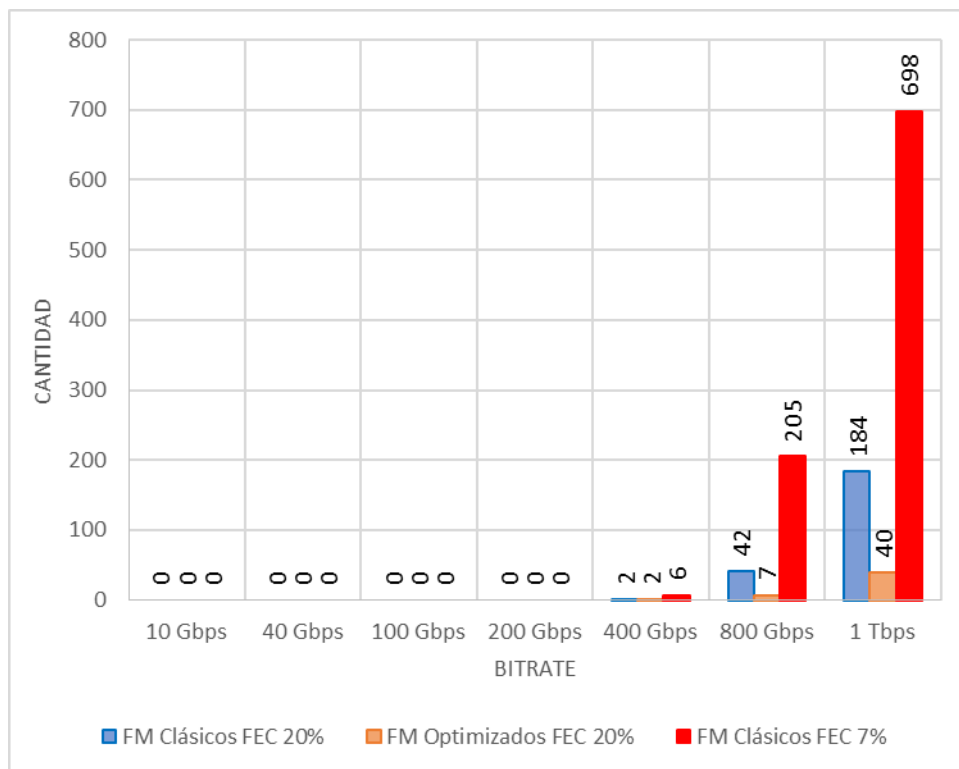


Figura 6.14: Solicitudes de conexiones rechazadas para escenario 2.